



Projecte Fi de Carrera

**Enginyeria Tècnica de Telecomunicació**

**Especialitat en Sistemes Electrònics**

---

# Estudi del desenvolupament i situació reglamentària de la Ràdio Cognitiva

Esther Martínez Domingo

---

Directora: Helena Rifà Pous

*Departament d'Enginyeria de la Informació i de les Comunicacions*

**Escola d'Enginyeria**

**Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)**

Juliol 2011



El sotasignant, Helena Rifà Pous, Professora de l'Escola d'Enginyeria de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB),

CERTIFICA:

Que el projecte presentat en aquesta memòria de Projecte Fi de Carrera ha estat realitzat sota la seva direcció per l'alumne Esther Martínez Domingo.

I, perquè consti a tots els efectes, signa el present certificat.

Bellaterra, 23 de juny de 2011.

Signatura: Helena Rifà Pous



## Índex

Llistat d'Acrònims .....	6
Llistat de Figures .....	7
1 Introducció.....	11
1.1 Introducció i objectius .....	11
1.2 Situació actual .....	11
1.3 Motivació .....	12
1.4 Estructura del projecte .....	12
2 Xarxa ràdio cognitiva .....	15
2.1 Tecnologia de la ràdio Cognitiva .....	17
2.2 Arquitectura d'una CRN.....	20
2.2.1 Components de la xarxa .....	20
2.3 Funcions de la xarxa CR .....	23
2.3.1 Funcions de la xarxa CR a la banda de llicència.....	23
2.3.2 Funcions de la xarxa CR a la banda sense llicència.....	24
2.4 Spectrum sensing .....	24
2.5 Cancel·lació d'interferències.....	25
2.5.1 Avaluació i modelat de la interferència .....	26
2.5.2 Interferència de la xarxa CR a la xarxa primària.....	26
2.5.3 Interferència de la xarxa primària a les xarxes CR.....	29
2.6 Aplicacions de les CRNs .....	33
2.7 Sumari.....	34
3 Gestió de l'espectre radioelèctric .....	36
3.1 Visió general de l'espectre.....	36
3.1.2 L'espectre radioelèctric és un recurs escàs.....	36
3.2 Gestió de l'espectre.....	39
3.2.1 Objectius de la gestió de l'espectre .....	39
3.2.2 Models de gestió de l'espectre .....	40
3.3 Assignació de freqüències i fixació de preus de l'espectre.....	41
3.3.1 Atribució, adjudicació i assignació de freqüències .....	41
3.3.2 Assignació primària de l'espectre.....	43
3.3.3 Fixació de preus de l'espectre .....	44
3.3.4. El mercat secundari de l'espectre .....	45
3.4 Gestió per a la compartició de l'espectre .....	46

3.5 Sumari.....	46
4 Comercialització de l'espectre radioelèctric en les xarxes de ràdio cognitiva .....	48
4.1 Introducció a la comercialització de l'espectre radioelèctric .....	48
4.1.1 Estructures de l' <i>spectrum trading</i> .....	49
4.1.2 Objectius de l' <i>spectrum trading</i> .....	50
4.1.3 Tècniques aplicables a l' <i>spectrum trading</i> .....	52
4.3 Classificació de l' <i>spectrum trading</i> .....	53
4.4 Gestió de la informació.....	55
4.5 Preus del recurs ràdio.....	56
4.6 Autenticació, Autorització i Comptabilitat en la comercialització de l'espectre .....	57
4.7 Sumari.....	59
5 Organismes reguladors i activitats d'estandardització .....	61
5.1 Activitats d'estandardització.....	62
5.1.1 IEEE SCC 41.....	62
5.1.2 Altres estàndards IEEE .....	63
5.2 Sumari.....	64
6 Introducció de la ràdio cognitiva a les bandes de televisió .....	66
6.1 Estats Units. FCC.....	67
6.2 Canadà .....	67
6.3 Regne Unit. OFCOM .....	68
6.4 IEEE 802.22 .....	70
6.4.1 Preliminars de l'IEEE 802.22.....	70
6.4.2 El sistema de l'IEEE 802.22 .....	71
6.4.2.5 Interfície aèria .....	75
6.5 Sumari.....	84
7 Situació de la ràdio cognitiva Espanya i Europa.....	86
7.1 Situació a nivell regulatori .....	86
7.1.1 Situació a Europa .....	86
7.1.2 Situació a Espanya .....	86
7.2 Visió jurídica de l'espectre radioelèctric a Espanya .....	87
7.3 El Mercat Secundari a Espanya .....	88
7.4 Sumari.....	89
8 Conclusions .....	91
Referències.....	92

## **Llistat d'Acrònims**

ANR	Autoritat Nacional de Regulació
CEPT	Conferencia Europea de Correus i de Telecomunicació
CMT	Comissió del Mercat de les Telecomunicacions
CR	Cognitive Radio
CRN	Cognitive Radio Networks
DSAN	Dynamic Spectrum Access Networks
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ITU	Internacional Telecommunication Union
LGTel	Lei General de Telecomunicaciones
MAC	Media Access Control
OFCOM	UK Office of Communications
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
PHY	Physiscal Layer
PIRE	Potència Isotròpica Radiada Equivalent
QoS	Quality of Service
SETSI	Secretaria d'Estat de Telecomunicacions i per a la Societat de la Informació
SINR	Signal to Interference-plus-Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SOI	Signal Of Interest
WRAN	Wireless Local Area Network

## Llistat de Figures

Figura 1. Diagrama de flux de dades de la ràdio cognitiva.....	16
Figura 2. Concepte de forat espectral.....	18
Figura 3. Arquitectura de la CRN .....	20
Figura 4. Temperatura d'interferència. En el model ideal (a) la freqüència central ( $f_c$ ) i l'ample de banda (B) són conegudes. En el model generalitzat (b), tot el rang de freqüència és considerat com a soroll. L'ample de banda i la freqüència central no es coneixen .....	28
Figura 5. Coexistència d'una xarxa primària amb xarxes CR distribuïdes a l'atzar amb la il·lustració de la regió d'exclusió, l'espai en negre (regió de servei), l'espai en gris (regió d'interferència) i, l'espai en blanc. ....	30
Figura 6. Diagrama de blocs d'un receptor CR mitjançant l'estimació de la interferència i cancel·lació.....	32
Figura 7. Principals usos de l'espectre radioelèctric a Espanya al 2008 .....	37
Figura 8. Percentatge d'espectre radioelèctric destinat als serveis principals (estudi realitzat al 2008).....	38
Figura 9. Mesura de la utilització de l'espectre a l'àrea metropolitana de Barcelona .....	39
Figura 10. Atribució de l'espectre radioelèctric en tres regions .....	42
Figura 11. Adjudicació i assignació de freqüències.....	43
Figura 12. Comercialització de l'espectre radioelèctric entre el mercat primari i el mercat secundari.....	49
Figura 13. Ingressos d'un venedor de l'espectre radioelèctric versos la utilitat d'un comprador de l'espectre .....	51
Figura 14. Classificació de la comercialització de l'espectre radioelèctric .....	53
Figura 15. Comercialització periòdica i esporàdica de l'espectre .....	55
Figura 16. Probabilitat d'inicialització d'una trucada respecte el preu.....	57
Figura 17. Esquema AAC.....	58
Figura 18. Exemple del subministrament de les estacions bases als usuaris de la mateixa cel·la.....	72
Figura 19. Característiques de l'IEEE 802.22 RAN sense fils i comparació amb altres estàndards sense fils.....	74
Figura 20. Exemple de l'ocupació dels canals de televisió pels operadors tradicionals en el temps i freqüència.....	78
Figura 21. Relació entre la gestió espectral i altres entitats de funció cognitiva.....	82

## **Llistat de Taules**

Taula 1. Significat d'atribució, adjudicació i assignació .....	41
Taula 1. Característiques de l'IEEE 802.22.....	74
Taula 3. Requisits de detecció.....	76





# Capítol 1

## **1 Introducció**

### **1.1 Introducció i objectius**

Aquest projecte titulat “Estudi del desenvolupament i situació reglamentària de la Ràdio Cognitiva” estudia una nova tecnologia, la ràdio cognitiva, per a fer un ús més eficient de l’espectre radioelèctric.

Donada la repartició actual de l’espectre radioelèctric, on és habitual trobar franges freqüencials sense usar, fa pensar en una nova forma d’utilització espectral per fer un millor ús de l’espectre i permetre que es pugui posar en funcionament noves tecnologies.

L’objectiu principal d’aquest projecte és analitzar el concepte de ràdio cognitiva des d’un punt de vista funcional i regulatori. Des del punt de vista funcional, s’estudiarà el operativitat de les xarxes de ràdio cognitiva, la seva arquitectura i, la convivència amb altres usuaris.

La ràdio cognitiva obre noves vies d’accés a l’espectre radioelèctric, pel que, des del punt de vista dels òrgans reguladors, és una oportunitat d’augmentar l’ús d’aquest espectre. Al mateix temps és necessari garantir els drets dels propietaris actuals de l’espectre i per tant, la introducció al mercat de la ràdio cognitiva ha de venir precedida del corresponent procés d’estandardització. Per això, en aquest projecte es farà una introducció d’aquests estàndards i s’aprofundirà a fons amb l’estàndard IEEE 802.22, ja que és el primer en aplicar la ràdio cognitiva, en concret, a les bandes de televisió.

### **1.2 Situació actual**

En els últims anys hem sigut testimonis de l’escassetat de l’espectre radioelèctric, és a dir, de la creixent demanda de l’espectre i la seva infrautilització. És freqüent trobar bandes freqüencials terriblement congestionades (com, per exemple, les de telefonia mòbil) i bandes completament en desús. La major part de

l'espectre útil s'assigna als usuaris amb llicència que no utilitzen tot l'espectre en tot moment. Tot això suggereix la necessitat d'altres polítiques més flexibles i dinàmiques de l'assignació de l'espectre, com les que es deriven de l'ús de les ràdios cognitives.

La idea bàsica consisteix en permetre a usuaris sense llicència, accedir de manera oportunista a certes bandes de l'espectre temporalment desocupades, garantint als usuaris principals, que posseeixen els drets sobre aquestes bandes, la impossibilitat d'interferències.

Encara que la investigació de les ràdios cognitives ha estimulat molt interès, moltes qüestions en el pla científic, tecnològic i normatiu, segueixen sent un impediment per a l'adopció generalitzada de les xarxes CR (CRN, *Cognitive Radio Network*).

### **1.3 Motivació**

La principal motivació d'aquest projecte és l'estudi de la ràdio cognitiva per ser una tecnologia molt innovadora, poc desenvolupada i encara en fase d'investigació. Per això, el que es vol és conèixer de fons com funciona les xarxes de ràdio cognitiva i en quin grau de desenvolupament i implementació es troba, per així conèixer quin és el futur desplegament i com de útil podria arribar a ser aquesta tecnologia.

### **1.4 Estructura del projecte**

Aquest projecte està organitzat en 8 capítols. Essent aquest el primer capítol; en el segon s'explica la tecnologia Ràdio Cognitiva, principalment el funcionament, les característiques, l'arquitectura de la xarxa, la gestió de les interferències i les aplicacions més directes. El tercer capítol es centra en l'actual mètode de gestió espectral, descrivint el procés d'assignació de freqüències i preus. En el quart

capítol, s'analitza de fons la comercialització de l'espectre radioelèctric en les xarxes de ràdio cognitiva (*spectrum trading*) i es definirà el concepte *d'autenticació, autorització i comptabilitat* que garanteixen un comerç espectral segur. En el cinquè capítol, s'introdueix els estàndards vigents que estudien la implementació de la ràdio cognitiva i, en el sisè capítol, s'aprofundeix en l'estàndard IEEE 802.22. En el capítol 7, s'analitzarà la possibilitat d'implementar la ràdio cognitiva a Espanya i Europa, des d'una visió jurídica i econòmica. Finalment, en l'últim capítol es defineixen les conclusions generals del projecte.

# Capítol 2

## 2 Xarxa ràdio cognitiva

Avui en dia les xarxes sense fils estan regulades per una política fixa d'assignació de l'espectre. L'espectre es troba regulat per organismes governamentals i s'assigna a titulars amb llicència. Amb aquesta regulació, sols el titular de la llicència pot accedir a l'espectre, deixant l'ús totalment prohibit a altres usuaris. Desafortunadament, una gran part de l'espectre s'usa esporàdicament deixant parts lliures i amb desús. És a dir, cada servei té reservat un espectre i per tant, hi ha serveis que poden tenir pocs titulars però que tot i així tenen un gran marge d'ample de banda per usar.

Segons la Comissió Federal de Comunicacions (FCC, *Federal Communications Commission*), les variacions temporals i geogràfiques en la utilització de l'espectre oscil·len entre un 15% i un 85% [1] a causa de la repartició actual de l'espectre radioelèctric dels diferents serveis, que fan que algunes bandes es trobin saturades i altres totalment inutilitzades en el mateix moment.

La infrautilització de l'espectre fa necessari la gestió del mateix per aprofitar els actuals recursos ràdio d'una manera més eficient i garantir bandes freqüencials disponibles per a noves tecnologies, serveis o sistemes.

Les CRNs també conegudes com xarxes d'accés dinàmic a l'espectre (DSAN, *Dynamic Spectrum Acces Network*), proporcionaran un gran ample de banda als usuaris mòbils a través d'arquitectures sense fils i tècniques d'accés dinàmic a l'espectre. Aquest accés dinàmic es proposa com a solució al problema de la ineficiència de l'ús espectral.

El concepte clau que permet el desenvolupament d'aquest tipus de xarxa és la tecnologia CR (*Cognitive Radio*). Les tècniques CR proporcionen la capacitat per usar o compartir l'espectre de forma oportunista, operant en el millor canal disponible. Més concretament, aquestes tècniques permetran als dispositius, detectar els forats espectrals tenint en compte la presència d'usuaris amb llicència que estiguin operant a una banda legítima. Els usuaris amb llicència sempre tenen prioritat en l'ús de l'espectre, per tant, en el cas de presència d'un usuari primari,

els usuaris de ràdio cognitiva deixaran vacant el canal actual i buscaran un nou forat espectral.

Si tenim en compte la transmissió de dades, podem compondre el diagrama de flux d'un dispositiu genèric de ràdio cognitiu, mostrat a la figura 1.

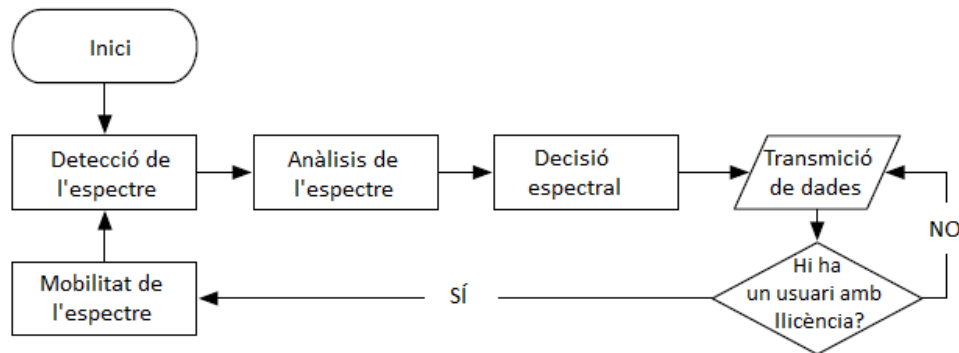


Figura 1. Diagrama de flux de dades de la ràdio cognitiva

- *Detecció de l'espectre o spectrum sensing*: Un requisit molt important per al correcte funcionament de la ràdio cognitiva és que ha de ser capaç de detectar l'espectre desaprofitat i utilitzar-lo sense provocar interferències negatives a altres usuaris. La millor manera per trobar "forats" a l'espectre, és detectar els usuaris principals (legítims).

- *Gestió de l'espectre*: Utilitzar l'ample de banda que satisfaci els requeriments de l'usuari entre tots els amples de banda disponibles. L'administració de l'espectre consta de dos passos diferenciats: l'anàlisi de l'espectre i la decisió espectral.

- *Anàlisi de l'espectre*: Identificar les característiques de cada banda disponible per conèixer els avantatges o inconvenients d'utilitzar-lo (retard, probabilitat d'error, etc.).



- *Decisió espectral:* La CR determina la taxa de dades, el mode de transmissió i l'ample de banda de transmissió. Després, la banda de l'espectre apropiada s'escull tenint en compte les característiques de l'espectre i els requisits de l'usuari.
  
- *Mobilitat de l'espectre:* És el procés amb el que una ràdio cognitiva canvia la seva freqüència de transmissió o recepció a una de millor o buida. Les CR estan ideades per canviar de banda constantment a altres millors, d'una forma imperceptible per l'usuari.
  
- *Compartició de l'espectre:* Trobar un mètode de distribució de l'espectre que sigui equitatiu i just per a tots els usuaris de ràdio cognitiva sense interferir en les transmissions dels usuaris legítims. Aquest és un dels majors reptes a l'hora de dissenyar les CRs.

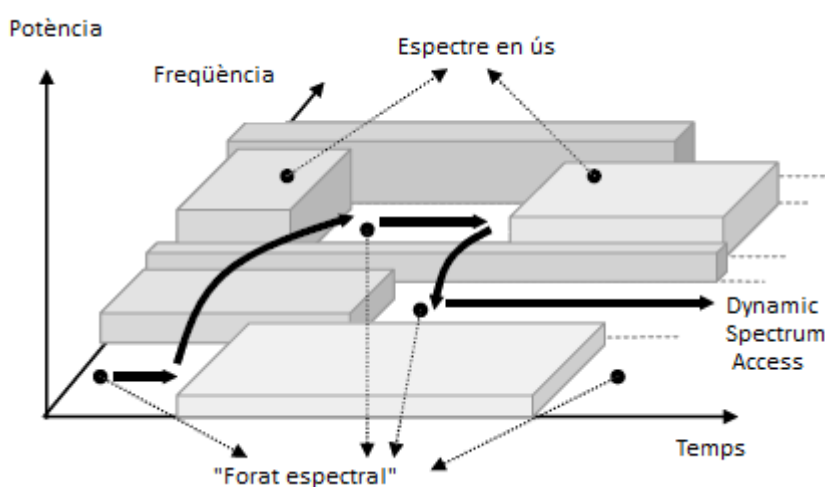
Una vegada determinat la banda de funcionament, ja es pot realitzar la comunicació en aquesta banda. Degut a que el medi ràdio canvia amb el temps i l'espai, la CR ha de realitzar un seguiment dels canvis. Si la banda de l'espectre que s'està utilitzant passa a un estat no disponible, bé perquè apareix un nou usuari secundari o perquè les condicions del canal empitjoren (qualsevol canvi en l'ambient durant la transmissió com l'aparició d'un usuari primari, moviments del propi usuari, etc.), la funció de *mobilitat de l'espectre* es porta a terme per obtenir una transmissió correcta.

## 2.1 Tecnologia de la ràdio Cognitiva

La tecnologia CR és la que permet a una CRN utilitzar l'espectre de forma dinàmica canviant els seus paràmetres de transmissió basant-se amb la interacció amb el medi.

Existeixen dues característiques principals [2, 3]:

- *Capacitat cognitiva:* És la capacitat de la tecnologia ràdio de capturar la informació dels dispositius ràdio que la rodegen a temps real. Per a això, és necessari l'ús de tècniques per capturar les variacions en l'ambient ràdio i evitar interferències amb altres usuaris. Gràcies a aquesta capacitat, les bandes que no es troben en ús en algun moment específic, es poden identificar com espai en blanc o forat espectral. Així, es pot seleccionar el millor espectre i els paràmetres de funcionament. En la figura 2 es pot observar el concepte de forat espectral.



**Figura 2. Concepte de forat espectral**

- *Reconfigurabilitat:* Permet a la ràdio ser dinàmica d'acord amb el medi, és a dir, la CR pot ser programada per transmetre i rebre en una varietat de freqüències i utilitzar diferents tècniques/tecnologies d'accés. Aquesta capacitat permet a la CR adaptar-se fàcilment a la dinàmica de l'entorn ràdio. Hi ha diversos paràmetres reconfigurables [4] els quals s'anomenen i expliquen a continuació de forma resumida.

- *Freqüència de treball:* La CR és capaç de variar la freqüència de treball a la més adequada segons la informació ràdio de l'entorn.
- *Modulació:* Una CR ha de reconfigurar el sistema de modulació adaptant-se a les necessitats de l'usuari i a les condicions del canal. Per

exemple, en el cas d'un retard perceptible en l'aplicació, la taxa de dades és més important que la taxa d'error. Així, el sistema de modulació que permet una major eficiència espectral és el seleccionat. Per contra, la pèrdua de sensibilitat en les aplicacions es centra en la taxa d'error, requerint un sistema de modulació amb una taxa d'error baixa.

- *Potència de transmissió:* La potència de transmissió es pot reconfigurar dins d'unes limitacions. El control de potència permet la configuració dinàmica d'aquesta dins del límit permès. Si no és necessari operar a la major potència, la ràdio cognitiva redueix la potència de transmissió a un nivell inferior per permetre compartir amb altres usuaris l'espectre i reduir el nivell d'interferències.

Els paràmetres de transmissió d'una CR es poden reconfigurar no tan sols al començament de la transmissió, sinó també durant la transmissió. Segons les característiques de l'espectre, aquests paràmetres es poden executar de manera que si la ràdio cognitiva canvia a un espectre diferent (*mobilitat espectral*), els paràmetres de transmissió i recepció s'adapten i, s'utilitzen els paràmetres del protocol de comunicació i sistema de modulacions adequats a aquesta situació.

Així doncs, l'objectiu de la CR és obtenir el millor espectre disponible a través de la capacitat cognitiva i la reconfigurabilitat. Donat que la major part de l'espectre ja es troba assignat, el repte més important és compartir l'espectre amb els usuaris que posseeixen la llicència. La CR permet l'ús temporal de l'espectre que no està en ús (espais en blanc o forats espectrals). Si aquesta banda passa a ser utilitzada per a un usuari amb llicència, la CR trasllada a l'usuari secundari a un altre forat espectral o es manté en el mateix alterant el seu nivell de potència de transmissió o modulació per evitar interferències.

## 2.2 Arquitectura d'una CRN

Una part de l'espectre ja està assignat a diverses aplicacions amb llicència, mentre que altres bandes permeten l'ús sense tenir llicència. Per al desenvolupament de protocols de comunicació, és essencial tenir una clara descripció de l'arquitectura de la CRN.

### 2.2.1 Components de la xarxa

Els components de l'arquitectura de xarxa, que es mostren a la figura 3, es poden classificar en dos grups: la xarxa primària i la xarxa secundària o CRN.

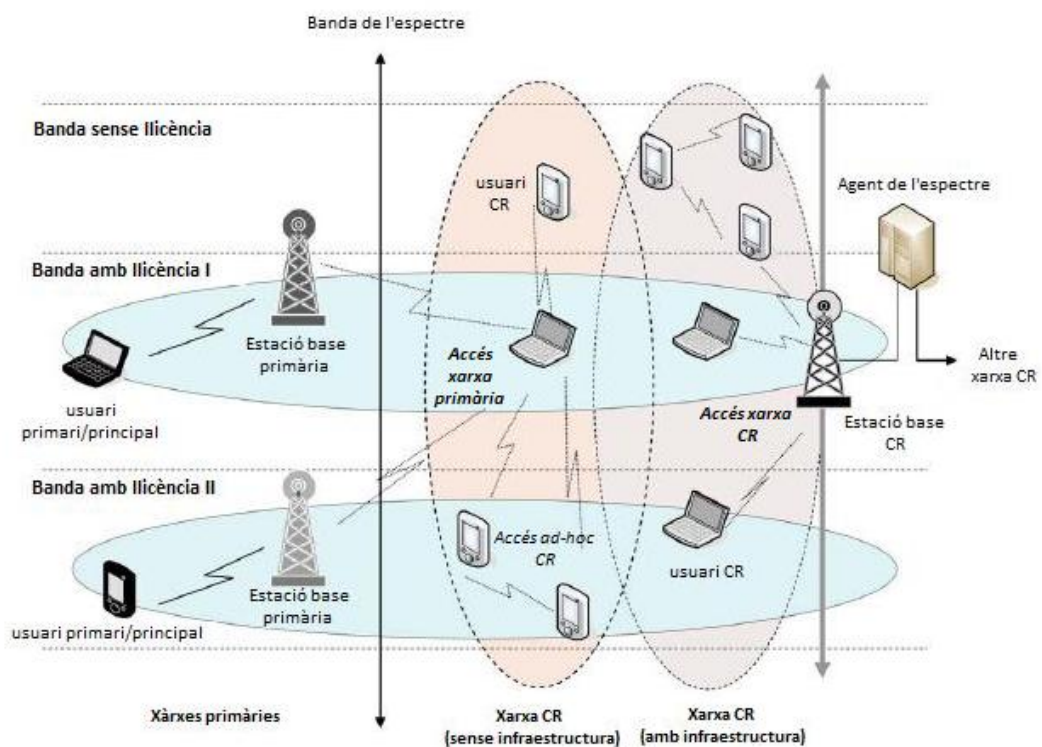


Figura 3. Arquitectura de la CRN

### **2.2.1.1 Xarxa primària**

La xarxa primària (o xarxa amb llicència) es refereix a la infraestructura de xarxa existent. Aquesta xarxa té dret exclusiu dins d'una determinada banda de l'espectre, per exemple, l'emissió de televisió o de telefonia mòbil. Els components de la xarxa primària són els següents:

- *Usuari primari o principal:* L'usuari primari (o usuari amb llicència) té una llicència per operar en una determinada banda de l'espectre. Aquest accés només pot ser controlat per l'estació base primària i no s'ha de veure afectat per usuaris que operin sense llicència. Els usuaris primaris no necessiten cap tipus de modificació o funció addicional per coexistir amb estacions base secundàries o usuaris secundaris.

- *Estació base primària:* L'estació base primària (o estació base amb llicència) és un component d'infraestructura de xarxa fix que té una banda de freqüència (amb llicència) de treball, tal i com succeeix amb les estacions base en els sistemes de telefonia mòbil. En principi, l'estació base no té cap capacitat cognitiva per compartir l'espectre amb usuaris secundaris. No obstant això, l'estació base principal o primària demanarà a tots dos la llicència i el protocol CR per a la xarxa d'accés primària per als usuaris secundaris.

### **2.2.1.2 Xarxa secundària**

La xarxa secundària (o CRN, xarxa d'accés dinàmic a l'espectre, xarxa sense llicència) no té llicència per operar a la banda desitjada. Per tant l'accés a l'espectre només es permet de manera oportunista. Les xarxes secundàries es poden desplegar com una infraestructura de xarxa i com xarxa *ad-hoc* tal com es mostra a la figura 3. Els components d'una xarxa secundària són els següents:

- *Usuaris CR:* Els usuaris CR (o usuaris sense llicència, usuaris secundaris) no tenen llicència en aquest espectre. Per tant, són necessàries les funcionalitats addicionals per poder compartir la banda d'espectre en que es necessita llicència.

- *Estació base CR*: L'estació base CR (o estació base secundària, estació base sense llicència) és un component de la infraestructura fixa amb capacitat CR. L'estació base secundària només estableix connexió amb usuaris secundaris que no posseeixen llicència d'accés a l'espectre. A través d'aquesta connexió, un usuari secundari pot accedir a altres xarxes.

- *Agent de l'espectre*: L'agent de l'espectre és una entitat central de la xarxa que juga el paper de la distribució dels recursos de l'espectre entre les diferents CRNs. L'agent de l'espectre es pot connectar a cada xarxa servint com informació l'espectre d'altres xarxes i així permetre la coexistència entre múltiples CRNs [5,6,7].

L'arquitectura d'una CRN, que es mostra a la figura 3, consta de diferents tipus de xarxa: la xarxa primària, una infraestructura de xarxa basada en CR, i una xarxa *ad-hoc* CR. Les CRNs són xarxes que funcionen sota l'entorn d'espectre mixt, és a dir, en bandes amb llicència i sense llicència (poden accedir a ambdues). A més, els usuaris secundaris es poden comunicar entre ells accedint a través de l'estació base. Així doncs, en CRNs, hi ha tres tipus diferents d'accés:

- *Accés CRN*: Els usuaris secundaris poden accedir a la seva pròpia estació base secundària, en una banda de l'espectre amb llicència o sense llicència. Com totes les interaccions es produeixen dins de la CRN, la normativa de compartició de l'espectre pot ser independent de la de la xarxa primària.

- *Accés ad-hoc CR*: Els usuaris CR poden comunicar-se amb altres usuaris CR a través d'una connexió *ad-hoc* en ambdues bandes de l'espectre (amb o sense llicència).

- *Accés xarxa primària*: Els usuaris secundaris poden accedir a l'estació base principal a través de la banda de llicència. A diferència dels altres tipus d'accés, els usuaris CR requereixen d'un protocol de control d'accés al medi adaptatiu (MAC, *Medium Access Control*), el qual permet comunicació sense fils a través de múltiples xarxes primàries amb diferents tecnologies d'accés.

## 2.3 Funcions de la xarxa CR

Com ja s'ha explicat anteriorment, la xarxa CR pot funcionar en dues bandes: amb o sense llicència. Per tant, les funcionalitats necessàries per a aquesta xarxa varien d'acord si l'espectre té llicència o no. En conseqüència, podem classificar operacions de la banda amb llicència i de la banda sense llicència. Les funcions de la xarxa CR s'expliquen a continuació d'acord amb aquesta classificació.

### 2.3.1 Funcions de la xarxa CR a la banda de llicència

Hi ha forats de l'espectre radioelèctric amb llicència que no són utilitzats temporalment. Per tant, les xarxes CR es poden implementar per explotar aquests forats de l'espectre a través de tècniques de comunicació cognitiva. L'arquitectura utilitzada es mostra a la figura 3, on coexisteix la xarxa CR amb la primària, en el mateix lloc i en el mateix espectre.

Existeixen diversos desafiaments per a les xarxes CR a causa de l'existència d'usuaris primaris amb llicència. Encara que el propòsit principal de la xarxa CR és determinar la gamma de freqüències més baixes, les funcions de la xarxa CR a la banda de llicència té com a objectiu la detecció de la presència dels usuaris principals.

La capacitat dels forats del canal depèn de la interferència que provoquen els usuaris secundaris als primaris. Per tant, l'objectiu principal de l'arquitectura d'una CR és evitar la interferència amb els usuaris primaris. D'altra banda, si els usuaris primaris apareixen en l'espectre ocupat pels usuaris CRs, aquests han d'abandonar l'espectre actual on estan treballant i passar immediatament a un nou espectre disponible. Aquest pas s'anomena *mobilitat espectral*.

### 2.3.2 Funcions de la xarxa CR a la banda sense llicència

Les xarxes CR estan dissenyades per a funcionar en bandes sense llicència de tal manera que l'eficiència sigui bona en aquesta part de l'espectre. L'arquitectura de la xarxa CR sense llicència es mostra a la figura 3. Atès que no hi ha titulars amb llicència, totes les entitats de la xarxa tenen el mateix dret a accedir a l'espectre. Múltiples xarxes CR coexisteixen en la mateixa zona i es comuniquen utilitzant la mateixa porció de l'espectre. Existeixen algorismes intel·ligents de la compartició de l'espectre que poden millorar l'eficiència de l'espectre, l'ús i el suport d'alta qualitat del servei. En aquesta arquitectura, els usuaris es centren en la detecció d'altres usuaris CR. Aquests han de competir entre si per la mateixa banda freqüencial. Per tant, es realitzen sofisticats mètodes de partició de l'espectre entre usuaris CR.

## 2.4 Spectrum sensing

Un requeriment essencial de les CRNs és la capacitat de detectar tant l'existència dels forats espectrals (per trobar oportunitats de transmissió), com de detectar la presència d'usuaris primaris (per no causar interferències). Per això, cada usuari monitoritza l'espectre de manera individual fent ús de tècniques de sensat i, possiblement, comparteix les observacions del mateix amb altres usuaris. Generalment, les tècniques d'*spectrum sensing* es poden classificar en tres grans categories: detecció d'energia, detecció per filtre adaptat i detecció cicloestacionària. Cada una d'elles ofereix un grau diferent de compromís entre complexitat i capacitat de detecció. L'aplicació de cada una d'elles, però, depèn de la quantitat d'informació disponible sobre les senyals primàries a detectar.

- *Detecció d'energia*: És un mètode òptim per a descobrir qualsevol senyal desconeguda, al mesurar l'energia d'una freqüència de ràdio en el canal de comunicacions. Aquest mètode compara l'energia de la senyal rebuda amb un



cert llindar de decisió i determina que la senyal està present si en nivell d'energia està per sobre de llindar. No necessita coneixement previ de la senyal a detectar.

- *Filtre adaptatiu*: És un sistema lineal invariant que la seva funció principal és detectar la presència d'una senyal de referència, dins d'una senyal rebuda (desconeguda), que ingressarà en el filtre. Requereix informació sobre l'usuari primari.

- *Detecció cicloestacionària*: Si la senyal de l'usuari primari té propietats cicloestacionàries (si la seva autocorrelació és una funció periòdica) pot ser detectada coneixen aquesta periodicitat. És un mètode robust per a nivells de SNR baixos però requereix un coneixement previ de la senyal a detectar

En el cas més general, la xarxa secundària no disposa de cap informació a priori de les senyals a detectar. En aquest cas, l'únic mètode de detecció possible és el de detecció d'energia.

## 2.5 Cancel·lació d'interferències

Com es va explicar a la introducció, l'espectre s'ha convertit en un recurs escàs i mal utilitzat. Un sistema de ràdio cognitiva ha de ser capaç de resoldre aquest problema mitjançant l'aprofitament de l'espectre lliure. No obstant, els usuaris cognitius han de ser conscients de les pertorbacions generades en els receptors primaris. Depenen del nivell d'interferència generada, el rendiment del sistema pot ser negatiu per l'usuari primari. Per tant, la interferència perjudicial ha de ser controlada pels usuaris secundaris utilitzant tècniques de cancel·lació d'interferències (IC, *Interference Cancellation*).

La gestió de les interferències intenta evitar la interferència perjudicial en el sistema primari utilitzant criteris de convivència entre els sistemes amb i sense llicència.

### **2.5.1 Avaluació i modelat de la interferència**

Les interferències que tenen lloc a les xarxes CR es poden classificar en dos tipus: interferència interna de la xarxa i interferència d'interconnexió de xarxes. La interferència interna de la xarxa, també coneguda com a auto - interferència, es refereix a la interferència causada dins d'una xarxa (ja sigui una xarxa primària o CRN). La interferència interna existeix fins a cert punt en tots els sistemes de comunicacions sense fils i, hi ha una gran quantitat de tècniques establertes per a atenuar aquestes interferències de forma efectiva.

Per altre banda, la interferència d'interconnexió de xarxes, es refereix a la interferència mútua entre les xarxes primàries i les xarxes de ràdio cognitiva.

El problema de la gestió de les interferències en la interconnexió de xarxes és doble. En primer lloc, els transmissors CR necessiten controlar cuidadosament les seves emissions per garantir que la qualitat del servei (QoS) de la xarxa primària no sigui degradada per la interferència dels senyals de la xarxa secundària. En segon lloc, els receptors CR han de ser capaços de lluitar eficaçment contra la interferència de la xarxa primària per desxifrar correctament les senyals secundàries i proporcionar qualitat de servei útil en la xarxa CR. El problema de la gestió de les interferències d'interconnexió és molt important per a les xarxes CR i és el focus d'aquest apartat.

Abans d'avaluar les tècniques IC en les xarxes CR, és desitjable primer fer un estudi de les característiques de les interferències que es volen cancel·lar.

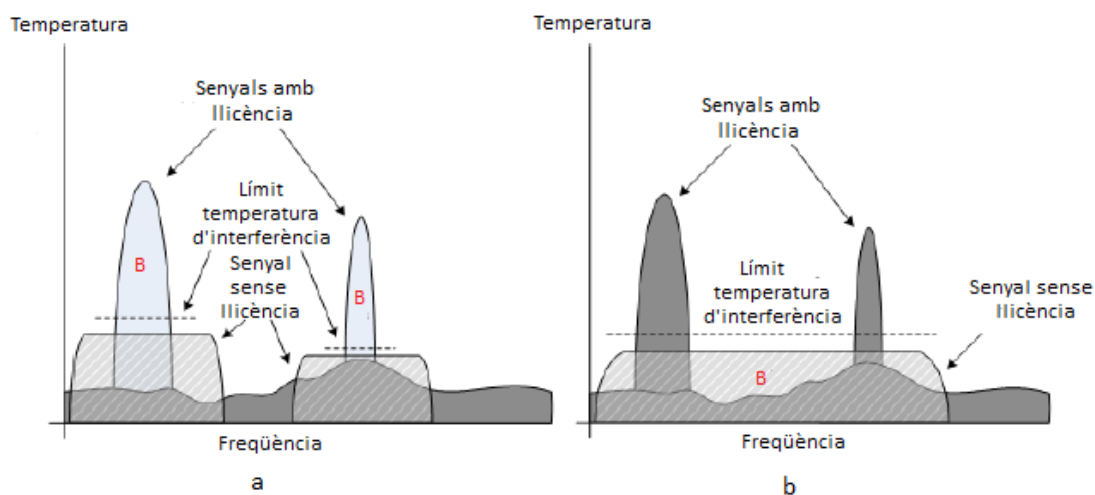
### **2.5.2 Interferència de la xarxa CR a la xarxa primària**

Al 2003, la Comissió Federal de Comunicacions (FCC) va introduir el concepte de temperatura d'interferència per "quantificar i gestionar la interferència" [8].

Es basa en la interferència que els receptors primaris són capaços de permetre, sense causar una pèrdua important de qualitat en el servei del sistema. Aquest mètode mesura la potència i l'ample de banda de la senyal d'interferència. Els usuaris sense llicència poden produir interferències fins a un límit específic anomenat límit de temperatura d'interferència  $T_L$ . És a dir,  $T_L$  representa la màxima quantitat d'interferència que un receptor pot tolerar. Aquest límit, establert pels reguladors, depèn de la tecnologia utilitzada pel sistema primari així com de la localització de la detecció. En altres paraules, segons la ubicació dels nodes secundaris, hi haurà diferents nivells de  $T_L$ . Els usuaris CR deixen d'utilitzar la banda de freqüència quan les seves transmissions violen els límits de temperatura d'interferència.

Hi ha dos mètodes en la gestió de la temperatura d'interferència. Un d'ells és quan els paràmetres (ample de banda  $B$  i freqüència central  $f_c$ ) del sistema primari són coneguts (model ideal) i, el segon és quan aquests paràmetres són desconeguts (model generalitzat). Com es pot observar a la figura 4a, en el model ideal, és possible tenir diferents límits de temperatura d'interferència. En aquest cas, la tecnologia utilitzada pel sistema primari es coneix, la qual podria ser un sistema de ràdio cognitiva desplegada a les bandes de televisió digital. Per tant, el problema de distingir entre les transmissions primàries i secundàries es fa més simple, i les senyals primàries no es consideren com una interferència. Quan l'usuari secundari està transmetent dades de banda ampla que es sobreposen en més d'un canal principal, el límit de temperatura baixa per establir la restricció.

En el cas del model generalitzat, com es pot veure a la figura 4b, els paràmetres principals es consideren desconeguts. Per tant, tots els senyals detectats es consideren com a interferència.



**Figura 4. Temperatura d'interferència.** En el model ideal (a) la freqüència central ( $f_c$ ) i l'ample de banda (B) són conegudes. En el model generalitzat (b), tot el rang de freqüència és considerat com a soroll. L'ample de banda i la freqüència central no es coneixen.

La interferència és manejada en els transmissors, el que significa que pot ser controlada en els transmissors secundaris mitjançant la modificació de la potència transmesa, transmissions fora de banda i canviant la seva ubicació [9]. Aquest mètode té algunes limitacions en la medició de la temperatura real de la interferència en els receptors primaris. El principal problema ve dels usuaris secundaris que no són conscients de la ubicació dels receptors primaris, perquè els receptors primaris són generalment dispositius passius. És realment difícil saber quin és el nivell real d'interferència en ells [9].

El mètode de la temperatura d'interferència seria un concepte interessant si la localització dels receptors primaris es conegués amb l'ajuda d'algun sistema de posicionament. Seria possible arribar a conèixer quina ha de ser la potència de transmissió màxima de cada transmissor secundari. La implementació del model ideal de temperatura requereix la interacció en temps real entre els transmissors CR i els receptors principals i per tant és considerat com a poc pràctic. Per això, la comissió de la FCC va abandonar aquest mètode per ser inviable al 2007.

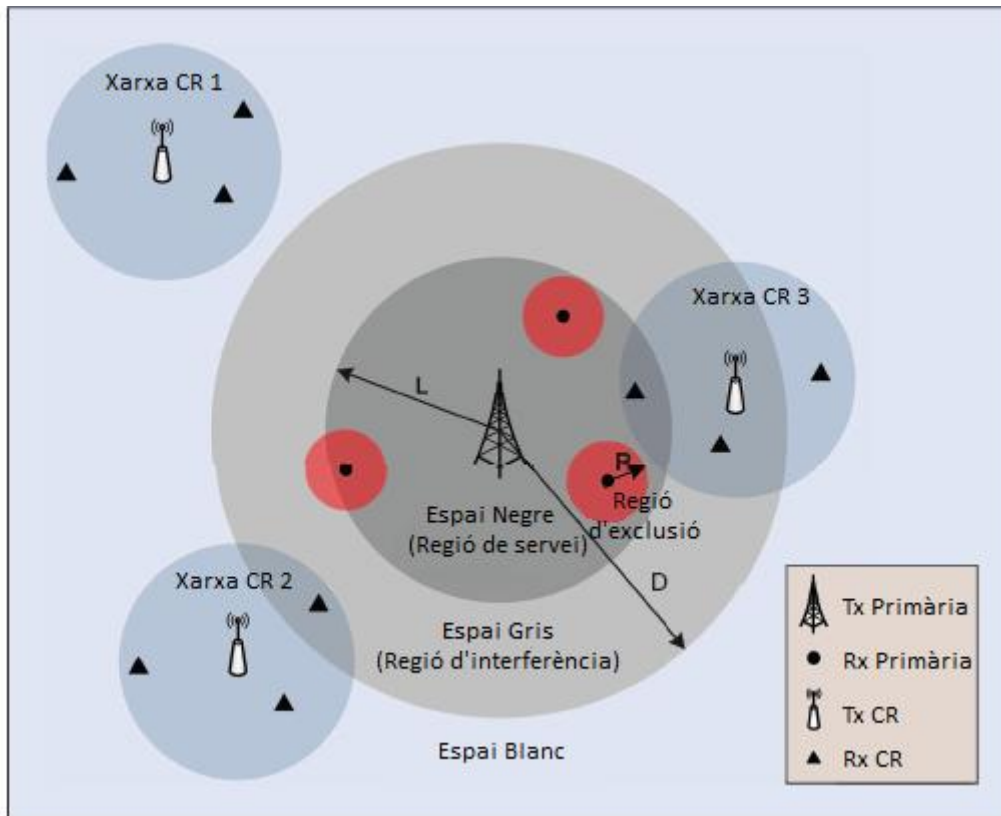
### 2.5.3 Interferència de la xarxa primària a les xarxes CR

La interferència de la xarxa primària a les xarxes CR pot ser directament mesurat pels receptors CR amb tècniques de detecció passiva. Sobre la densitat de l'espectre de potència (PSD) de les senyals interferents primàries, es pot classificar l'espectre en tres categories: 1) els espais en negre són espectralment ocupats per senyals primàries de gran potència, que poden ser descodificades pels receptors CR, 2) els espais grisos es refereixen a l'espectre de les senyals primàries de baixa potència, pel que són massa dèbils per a ser desxifrades satisfactòriament, però encara importants fonts d'interferència per la xarxa CR i 3) els espais en blanc es refereixen a l'espectre on les senyals primàries tenen una potència negligible i poden ser tractades com a soroll de fons.

Com es mostra a la figura 5, l'àrea de l'espai en negre, sovint considerada com la regió de servei, està formada per un disc circular de radi  $L$  centrat en el receptor principal. L'àrea de l'espai en gris, pel contrari, és un anell exterior amb un radi  $D$  al voltant de l'àrea de servei i és considerat com la regió d'interferència.

Intuïtivament, els espais en blanc són els recursos més desitjables per les xarxes CR per explotar, mentre que els espais en gris també poden ser reutilitzats per millorar la utilització de l'espectre. Pel contrari, els espais en negre no són gaire explotats per xarxes CR a causa de la presència de les fortes interferències de les senyals primàries.

Per tant, estudiaren diferents tècniques IC aplicables a un receptor que opera en els espais blanc, gris o negre. Mostrarem que un receptor CR adaptatiu pot elegir les seves estratègies IC per lluitar contra les interferències i permetre comunicacions secundàries inclús en els espais de color negre.



**Figura 5.** Coexistència d'una xarxa primària amb xarxes CR distribuïdes a l'atzar amb la il·lustració de la regió d'exclusió, l'espai en negre (regió de servei), l'espai en gris (regió d'interferència) i, l'espai en blanc.

### • Tècniques IC en els receptors CR

L'objectiu de les tècniques IC en un receptor CR es que pugui operar amb èxit ens els nivells més alts d'interferència de les xarxes primàries. Considerem un receptor de CR que opera a una banda de freqüència. En primer lloc, la senyal primària detecta i identifica la banda com un espai blanc, gris o negre. Basant-se en els resultats de la detecció, el receptor CR pot llavors optar per aplicar les tècniques corresponents per obtenir un rendiment optimitzat. Aquestes tècniques IC es resumeixen en les seccions següents.

#### · Tècniques IC en els espais en blanc

En els espais en blanc, la interferència en la banda de freqüència d'interès és despreciable i pot ser tractada com el soroll. Per tant, cap tècnica IC particular és necessària.

### · Tècniques IC en els espais en gris

La característica principal dels espais en gris és que la banda d'interès sofreix un nivell d'interferència entre baix i mitjà de les xarxes primàries. Per a aquest tipus d'interferència, és convenient utilitzar un tipus especial de tècnica IC anomenada *supressió de la interferència* que suprimeix la potència de les senyals primàries i per tant, millora la relació senyal a interferència i soroll (SINR) de les senyals secundàries. La supressió de les interferències es pot realitzar fent passar la senyal rebuda a través d'un filtre adaptat a les característiques de les senyals secundàries desitjades.

El mètode basat en filtres processa senyals en el domini del temps i té l'objectiu de separar la senyal d'interès (SOI, *Signal Of Interest*) i les senyals interferents basant-se en les seves propietats de potència espectral. L'objectiu és un filtre que proporcionï una freqüència desitjada de resposta, que augmenti les regions de l'espectre amb una SINR alta i suprimeixi aquells amb SINR baixa.

El mètode basat en filtres, especialment filtre lineal, és una tecnologia madura que pot portar-se a terme amb relativa baixa complexitat. Però, ja que es centra només en l'espectre de potència de les senyals, no es pot suprimir la interferència del co-canal o la interferència amb les forma d'ona similars (és a dir, amb la mateixa modulació i ample de banda). Per tant, les aplicacions del mètode basat en filtres per a xarxes CR són limitades.

### · Tècniques IC en els espais en Negre

Els espais en negre són generalment considerats com inservibles pels usuaris CR perquè: 1) el desplegament dels receptors primaris pot prohibir les transmissions dels CRs i 2) l'alta potència de les senyals d'interferència principal poden bloquejar les transmissions CR. Però, la presència de senyals primàries amb major potència també significa que els receptors principals poden ser capaços de tolerar un major nivell de interferència de les xarxes CR, fent que les transmissions CR siguin factibles sempre que el límit de la temperatura de la interferència no es violi.

Per altre banda, un receptor CR pot aplicar tècniques adequades d'IC per extreure informació secundària, fins i tot quan la senyal rebuda està dominada per la interferència d'una xarxa primària.

Dos mètodes poden ser utilitzats per a la cancel·lació d'interferències en els espais en negre. En primer lloc, si un receptor CR només té informació parcial de les senyals d'interferència (per exemple, les seves característiques) la mencionada tècnica de *supressió de interferències* es pot aplicar directament per suprimir la interferència. En segon lloc, si un receptor CR té informació completa de la senyal d'interferència, és a dir, el receptor CR és capaç de calcular amb precisió/recuperar les formes d'ona exactes de les senyals d'interferència, és llavors quan convé aplicar un tipus diferent de tècnica IC anomenada estimació de la interferència i cancel·lació [10], com es mostra a la figura 6



Figura 6. Diagrama de blocs d'un receptor CR mitjançant l'estimació de la interferència i cancel·lació

A diferència de la *supressió d'interferències* on la interferència és directament suprimida i tractada com a soroll de fons, l'estimació d'interferència i la cancel·lació es realitza en dos passos successius: 1) estimació exacte de la senyal interferent i 2) es resta la interferència estimada a partir del senyal rebut. És evident que la clau és obtenir una estimació precisa del senyal interferent abans de restar. Hi ha dos mètodes per a l'estimació de la interferència: extracció de la interferència i reconstrucció de la interferència.

#### · Extracció de la interferència

L'extracció de la interferència del senyal rebut es pot aconseguir mitjançant la supressió de les SOIs. Per tant, prèviament es discuteixen quines tècniques de



supressió poden seu usades per suprimir les SOIs i de tal manera extreure la interferència de la senyal primària.

· *Reconstrucció de la interferència*

En el cas de senyals primaris modulats digitalment, si un receptor CR rep un senyal primari i coneix la seva estructura de transmissió (per exemple, l'esquema de la codificació i la modulació), pot primer desmodular i descodificar la senyal primària per recuperar els bits originals. Llavors, el receptor pot reconstruir la senyal primària corresponent basant-se en el coneixement de la seva estructura de transmissió i la informació del canal.

## 2.6 Aplicacions de les CRNs

Les CRNs poden aplicar-se als casos següents:

- *Lloguer de xarxa*: La xarxa primària pot proporcionar un arrendament de xarxa permetent l'accés oportunista a l'espectre amb llicència, sense sacrificar la qualitat dels serveis de l'usuari principal [11]. Per exemple, la xarxa primària pot arrendar el dret d'accés a l'espectre a operadores de xarxa mòbil virtual. També la xarxa primària pot oferir els seus drets d'espectre a una comunitat regional amb la finalitat d'obtenir un accés de banda ampla.
- *Xarxa cognitiva mallada*: Les xarxes sense fils mallades s'estan convertint en una tecnologia rendible per a proporcionar connectivitat de banda ampla [12].
- *Xarxes d'emergència*: Seguretat pública i xarxes d'emergència són una altra àrea d'aplicació en la qual les CRN es poden implementar [13]. Una altra possible aplicació és en cas de desastres naturals, els quals temporalment inhabiliten o destrueixen les infraestructures de comunicacions existents i els treballs del personal d'emergència a les àrees del desastre fan necessaris establir una xarxa d'emergència. Les CRNs permeten l'ús de l'espectre existent sense la necessitat d'infraestructura.

- *Xarxes militars:* Una de les aplicacions més interessants de les CRNs és en el ambient ràdio militar [14]. Les CRNs permeten triar a les ràdios militars arbitràriament la freqüència intermèdia, l'ample de banda, la modulació, adaptant-se a la variabilitat de l'entorn ràdio del camp de batalla. Afegir que les xarxes militars tenen la necessitat d'una forta seguretat i protecció de les comunicacions en ambients desfavorables.

## 2.7 Sumari

En aquest capítol s'ha explicat de forma complexa les xarxes de ràdio cognitiva. Primer de tot s'han discutit els conceptes bàsics d'aquest tipus de xarxes, les característiques fonamentals (capacitat i reconfigurabilitat), l'arquitectura genèrica de la xarxa i les funcions principals. També, s'ha analitzat en detall el tipus d'interferències que es poden produir així com possibles tècniques de supressió de les mateixes. Per últim, s'ha mostrat les principals aplicacions d'aquestes xarxes.

# Capítol 3

### **3 Gestió de l'espectre radioelèctric**

L'espectre radioelèctric es troba regulat pel Govern. Aquest necessita ser gestionat i administrat per al seu ús. Per això, existeixen diferents models de gestió de l'espectre i diferents mètodes de fixació de preus. A continuació explicarem de manera general, què és l'espectre radioelèctric i com es gestiona, com s'assignen les freqüències als diferents serveis i com funciona la fixació de preus de l'espectre radioelèctric.

#### **3.1 Visió general de l'espectre**

L'espectre radioelèctric és el medi pel qual podem transportar la informació a través d'ones de ràdio. L'espectre radioelèctric compren les freqüències entre 9 KHz i 3000 GHz. Una de les principals característiques és que es tracta d'un medi finit. Per ser finit, aquest medi es converteix en un bé valuós que ha de ser administrat i controlat per l'Estat, el qual assigna la utilització de les diferents bandes de freqüència a diferents usuaris o serveis a àmplies regions geogràfiques.

##### **3.1.2 L'espectre radioelèctric és un recurs escàs**

L'espectre és un recurs limitat que s'utilitza per produir una gran varietat de serveis. La demanda de l'espectre és creixent i algunes bandes freqüencials són més demanades que altres. Això porta als reguladors a adoptar diversos enfocaments per a la millora del seu ús.

- Serveis que utilitzen l'espectre radioelèctric

En funció del rang de freqüències, aquestes es divideixen en bandes o canals en que el seu ús va destinat a diferents serveis: de difusió (ràdio i televisió), de comunicacions (mòbils, per satèl·lit, sense fils, seguretat, comunicacions aeronàutiques), posicionament (com el GPS), radar, etc. A més de les seves

aplicacions més conegudes, les freqüències de l'espectre també són necessàries per aplicacions molt diverses en àmbits com el militar, la radionavegació aèria, les operacions espacials o la radio afició. Els principals usos de l'espectre radioelèctric a Espanya es mostren a la figura 7.

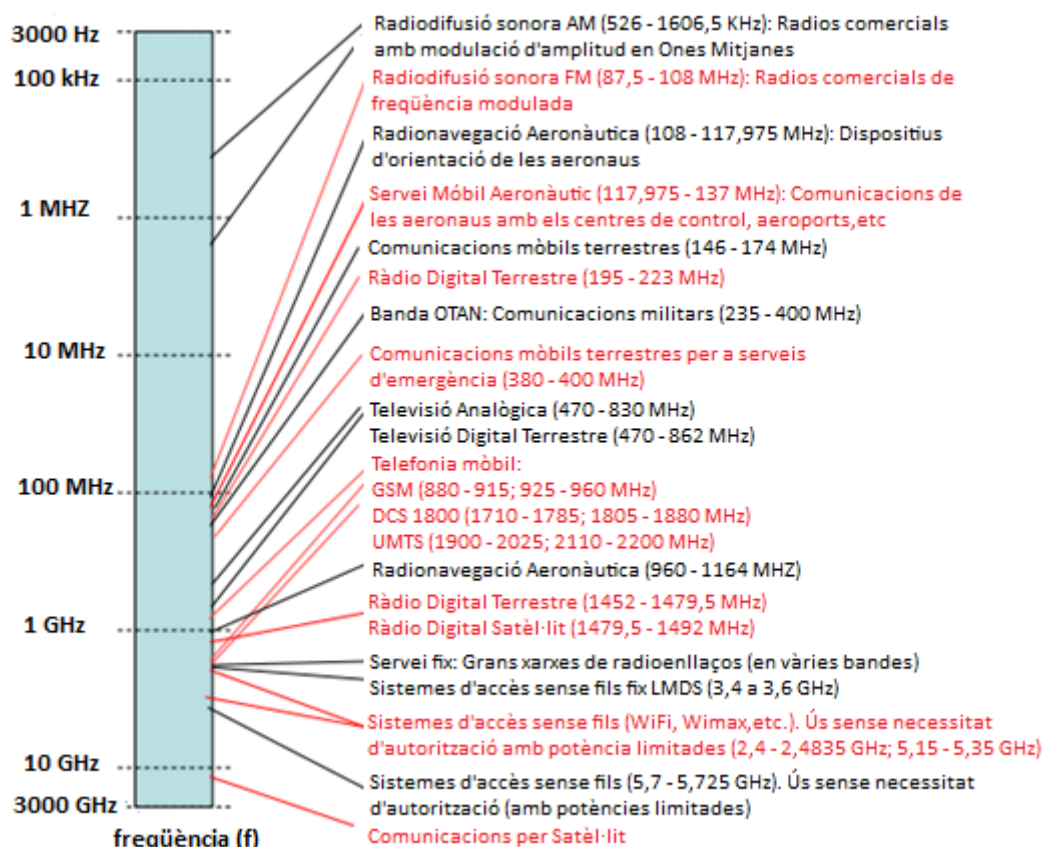
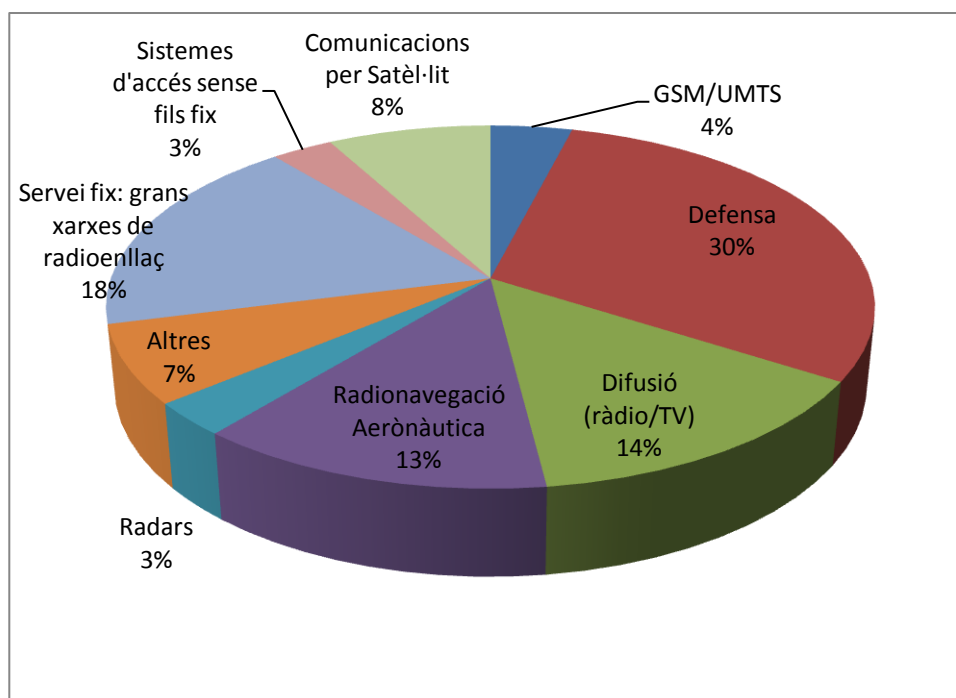


Figura 7. Principals usos de l'espectre radioelèctric a Espanya al 2008

Després de veure a la figura 7 el repartiment dels serveis en el rang de freqüències, la figura 8 mostra quins percentatge d'espectre es destina en alguns d'aquests serveis més importants. Podem veure que, un 30% de l'espectre es destina als serveis de defensa, mentre que només un 4% als serveis GSM/UMTS. Això ens porta a la conclusió que l'espectre està repartit de forma no gaire útil per a la seva màxima explotació.



**Figura 8. Percentatge d'espectre radioelèctric destinat als serveis principals (estudi realitzat al 2008)**

Un estudi realitzat recentment per la UPC (*Universitat Politècnica de Barcelona*) a l'àrea metropolitana de Barcelona sobre l'espectre comprès entre 75 Hz i 3 GHz, posa de manifest aquesta ineficiència en l'ús de l'espectre. Els resultats obtinguts en aquest estudi, revelen la existència de certes bandes de freqüència disponibles per al seu ús compartit, especialment entre 1 i 3 GHz, tal com es pot observar a la figura 9.

Si mirem la figura 8, podem veure clarament que els serveis com la radionavegació, defensa, etc., posseeixen un gran percentatge d'espectre radioelèctric sobre el total, en canvi a la figura 9 posa de manifest l'ús molt més inferior d'aquestes bandes respecte la resta.

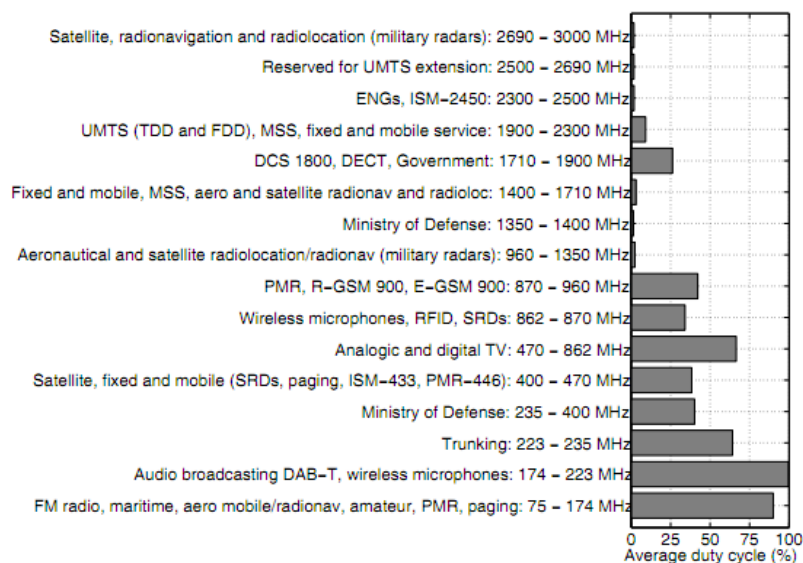


Figura 9. Mesura de la utilització de l'espectre a l'àrea metropolitana de Barcelona

Per tant, és necessària una nova administració de l'espectre radioelèctric que permeti optimitzar aquest recurs.

## 3.2 Gestió de l'espectre

### 3.2.1 Objectius de la gestió de l'espectre

Els objectius generals de gestió de l'espectre són:

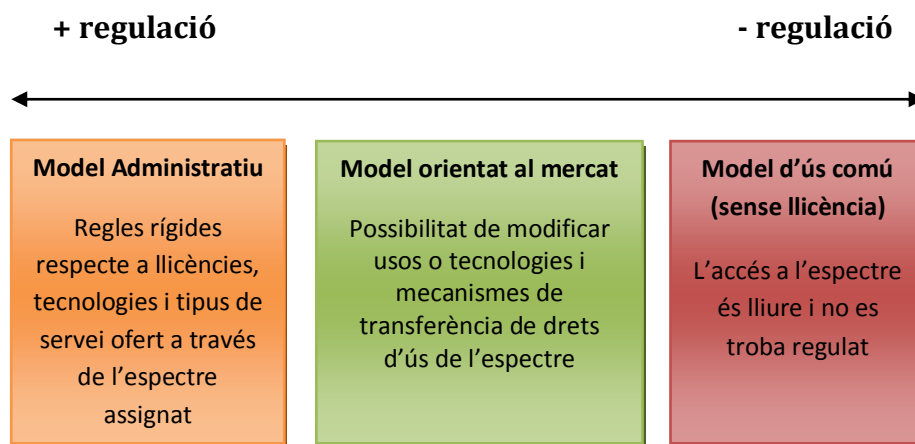
- *Eficiència econòmica*: garantir l'ús eficient de l'espectre radioelèctric assignat a fins públics i privats de forma que es compleixin els objectius del país, inclosos els de creixement econòmic.

- *Eficiència tècnica*: maximitzar la utilització del recurs evitant interferències i separacions (bandes de guarda) innecessàries. Assegurar que l'espectre radioelèctric sigui apte per a noves tecnologies i serveis i que sigui flexible l'adaptació de nous requeriments dels usuaris.

- *Objectius polítics*: que la política governamental, no discrimini, sigui transparent i just quan es realitza l'atribució i l'assignació de l'espectre entre els diversos usuaris. Assegurar la disponibilitat de l'espectre per a beneficis públics (salut, seguretat...).

### 3.2.2 Models de gestió de l'espectre

Actualment existeixen diferents models de gestió de l'espectre:



- *Model Administratiu*: l'Autoritat Nacional de Regulació (ANR) determina com es pot usar l'espectre i especifica per a quins serveis i amb quines tecnologies. L'ANR també decideix qui pot usar cada franja espectral, durant quan de temps i sota quines condicions. En aquest cas, es sol usar un sistema de concurs per a decidir qui rep el dret a utilitzar l'espectre. El mètode administratiu és el més utilitzat fins ara.

- *Model orientat al mercat*: aquest model precisa que primer es faci una definició dels drets de l'ús de l'espectre que s'adjudicarà. I una vegada passada aquesta tapa inicial, entra en joc el mercat de l'espectre. Això vol dir que, l'assignació inicial de l'espectre s'efectua mitjançant una subhasta i després d'aquesta, les llicències es poden transferir mitjançant mecanismes de mercat. Els



que comprin la concessió tindran la total llibertat de determinar quins serveis oferir i amb quina tecnologia.

- *Model d'ús comú (sense llicència)*: en aquest model no hi ha adjudicacions ni usos exclusius, de manera que múltiples usuaris comparteixen una mateixa banda de freqüència. Aquest model és vàlid en els casos que els usuaris tolerin o puguin gestionar interferències.

### 3.3 Assignació de freqüències i fixació de preus de l'espectre

L'assignació de freqüències als diferents serveis és un tema crucial per optimitzar el recurs. Existeixen diferents tècniques per a aquesta assignació i també per a la fixació de preus d'aquest recurs.

#### 3.3.1 Atribució, adjudicació i assignació de freqüències

La taula 1 mostra els significats dels tres conceptes principals d'atribució, adjudicació i assignació.

Distribució de freqüències entre...	Termes
Serveis	Atribució
Zones o països	Adjudicació
Estacions	Assignació

**Taula 1. Significat d'atribució, adjudicació i assignació**

- *Atribució*: és la inscripció d'una banda de freqüències determinada per a que sigui utilitzada per un o varis serveis en condicions específiques. S'especifica en el *Quadre d'Atribució de Bandes de Freqüències*. Existeixen varis tipus d'atribució:

- *Segons l'exclusivitat:*
  - Exclusiva: banda atribuïda a un sol servei de radiocomunicació.
  - Compartida: banda atribuïda a dos o més serveis. S'apliquen per maximitzar la utilització de l'espectre disponible.
- *Segons l'àrea geogràfica:*
  - Mundial: tot el planeta Terra té la mateixa distribució de freqüències
  - Nacional: cada nació utilitza una distribució freqüencial diferent.
  - Regional: l'UIT (*Unió Internacional de Telecomunicació*) va dividir el planeta en tres regions, en les quals la distribució de les freqüències pels diferents usos i serveis són similars per als països que estan dins d'una regió determinada.

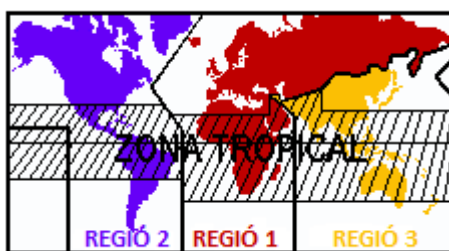


Figura 10. Atribució de l'espectre radioelèctric en tres regions

- *Adjudicació:* és la inscripció d'una banda determinada per a serveis de radiocomunicació, terrenal o espacial en un o varis països o zones geogràfiques, segons condicions especificades (aquestes adjudiquen un bloc de freqüències concret a cada zona geogràfica).
- *Assignació:* és l'autorització que dona una administració per a que una estació radioelèctrica utilitzi una freqüència o un canal determinat en condicions específiques (assignació de freqüències a operadores).

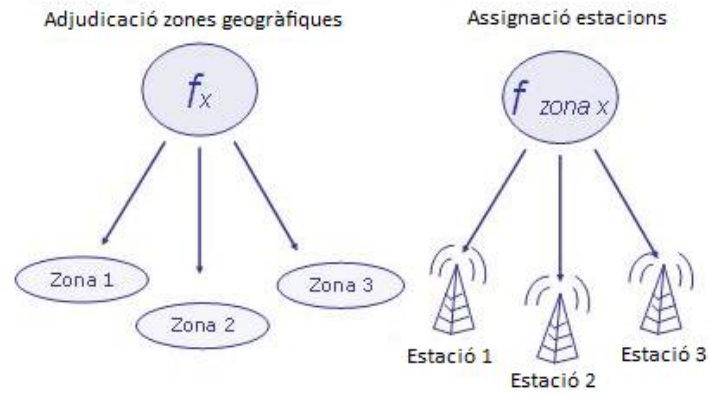


Figura 11. Adjudicació i assignació de freqüències

### 3.3.2 Assignació primària de l'espectre

El regulador té diferents formes d'assignar l'espectre:

- Si la demanda de l'espectre és escassa, s'assignaran drets a tots els que el sol·licitin, complint certes normes (el primer en demanar serà el primer en ésser servit, *first-come-first-served*).
- Si la demanda és major que l'espectre disponible el regulador ha de posar un criteri d'assignació. Aquest pot ser mitjançant un sorteig, concurs o subhasta.

	<b>Sorteig</b>	<b>Concurs</b>	<b>Subhasta</b>
<b>Característiques</b>	Selecció aleatòria dels agents als que s'assigna l'espectre	El regulador determina al més qualificat	Concessió de la subhasta als sol·licitants que més la valoren
<b>Avantatges</b>	Senzillesa i transparència	L'espectre s'assigna a agents que demostrin tenir potencial d'utilitzar-lo de manera eficaç	Transparència i eficiència en l'assignació
<b>Riscos</b>	Ineficiència i especulació (possible assignació a agents sense intensió de utilitzar-lo)	Falta de transparència i credibilitat. Sempre existeix un element subjectiu en l'avaluació de les propostes	Característiques dels mecanismes de mercat: col·lusió, especulació

### 3.3.3 Fixació de preus de l'espectre

El principal objectiu de qualsevol recurs és la maximització dels beneficis que pot generar per la societat. Els mètodes de fixació de preus més utilitzat són:

<b>Audiències Comparatives</b>	<b>Subhastes</b>	<b>Mercat Secundari</b>
<p>Les sol·licituds s'avaluen en funció de diferents criteris (cobertura, preus per servei, mediambientals, etc.)</p> <p>Els beneficis en accés se'ls queda l'operador</p> <p>Segueix el mètode d'Assignació Administrativa</p>	<p>Utilitzat també en l'assignació de l'espectre. És una forma de competir per la llicència presentant ofertes competitives. S'adjudica la llicència al millor postor (aquell que més diner ofereix).</p> <p>Els beneficis en accés dels queda l'Estat.</p> <p>Segueix el mètode d'Assignació de Mercat amb regles <i>a priori</i> del regulador</p>	<p>La venda/arrendament d'espectre per part dels titulars del dret d'ús d'espectre.</p> <p>La lliberització de l'ús de l'espectre contribueix a una millora de la utilització de l'espectre sempre que els operadors puguin elegir quin servei volen donar amb les mínimes limitacions.</p> <p>Segueix el mètode d'Assignació de Mercat pur</p>

### 3.3.4. El mercat secundari de l'espectre

Partint de la consideració de que l'espectre és un bé públic, la possibilitat de comercialització dels drets de l'ús de l'espectre entre els diferents agents autoritzats per a la prestació de serveis de telecomunicacions, permetria aconseguir una major disponibilitat d'aquest bé tan escàs i fer un ús més eficient del mateix utilitzant els excedents d'espectre. Es tindria un efecte positiu en la innovació tecnològica, hi hauria millor transparència en la fixació del valor, es reduirien les barreres d'entrada al mercat i s'accediria a l'espectre de manera més ràpida.

A continuació es mostra els avantatges i riscos de permetre i no permetre la comercialització de l'espectre per proporcionar nous serveis de comunicació.

	No permetre la comercialització	Permetre la comercialització
AVANTATGES	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Major control sobre l'ús que se li dona a l'espectre</li> <li>· S'evita acaparament</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ús eficient de l'espectre. Utilització d'espectre inutilitzat</li> <li>· Efecte positiu en innovació tecnològica</li> <li>· Millor transparència en la fixació del valor</li> <li>· Reducció de barreres d'entrada al mercat</li> <li>· Accés a l'espectre de manera més ràpida.</li> </ul>
RISCS	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Dificultats per obtenir l'espectre que es requereix per aconseguir els objectius del negoci</li> <li>· Ús ineficient de l'espectre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Risc de fer un ús ineficient de l'espectre per part de possibles especuladors</li> <li>· Risc de concentració de l'espectre</li> <li>· Risc de fragmentació excessiva de l'espectre</li> </ul>

Les següents bandes de freqüència tenen possibilitats de formar part del mercat secundari ja que són les bandes dels serveis més utilitzats i hi ha la possibilitat de trobar forats espectrals.

- **470-862 MHz:** aquesta banda s'utilitza actualment per a la radiodifusió.

- **880-915 MHz / 925-960 MHz i 1710-1785 MHz / 1805-1880 Mhz:** aquestes bandes s'utilitzen actualment per als serveis mòbils GSM.
- **1900-1980 MHz / 2010-2025 MHz / 2110-2170 MHz:** utilitzades per a serveis mòbils de tercera generació (IMT/2000/UMTS).
- **3,5 GHz:** utilitzades per a accessos WiMax.
- **2500-2690 MHz (banda de 2,6 GHz):** utilitzada per al seu ús dels serveis mòbils de tercera generació (IMT-2000/UMTS) i pel subministrament de la banda ample.

### 3.4 Gestió per a la compartició de l'espectre

La compartició de l'espectre permet que varis serveis utilitzin una mateixa porció d'espectre per a aplicacions i tecnologies diferents.

Formes de compartició de l'espectre:

- *Basada en mètodes administratius:* El regulador estableix on pot tenir lloc la interferència i les regles aplicables.
- *Basada en mètodes de mercat:* subhastes i comercialització secundària.
- *Basada en noves capacitats tecnològiques:* com a l'excés dinàmic a l'espectre, coexistent amb un usuari secundari amb usuaris principals, com per exemple la ràdio cognitiva.

### 3.5 Sumari

En aquest capítol s'ha explicat com funciona la gestió de l'espectre radioelèctric, és a dir, primer de tot s'ha descrit els objectius de la gestió espectral així com els models actuals de gestió. En segon lloc, s'ha mencionat com funciona l'assignació de freqüències i la fixació de preus de l'espectre i per últim s'ha estudiat els avantatges i inconvenients de permetre la comercialització de l'espectre en el mercat secundari.

# Capítol 4

## 4 Comercialització de l'espectre radioelèctric en les xarxes de ràdio cognitiva

Per dissenyar tècniques d'accés dinàmic a l'espectre d'una manera eficient i efectiva per a una xarxa de ràdio cognitiva, han de ser considerats tant aspectes tècnics com aspectes econòmics (com per exemple fixació de preus, subhasta de l'espectre, etc.).

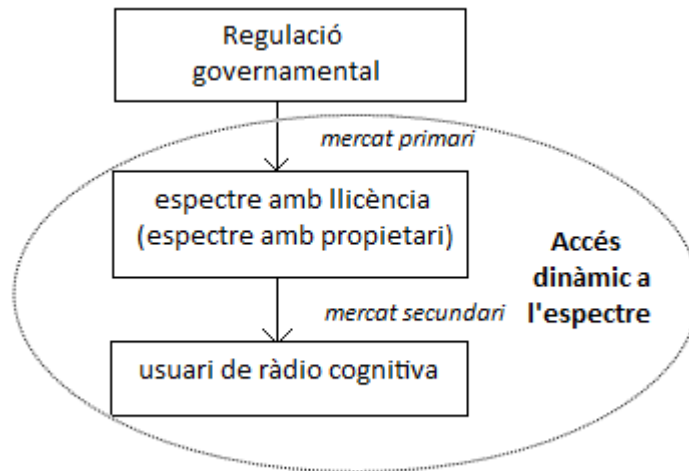
Les qüestions econòmiques són crucials per a les xarxes de ràdio cognitiva que operen sota el model d'ús exclusiu d'accés a l'espectre, ja són les que fan que els usuaris amb llicència cedeixin el dret d'accés a l'espectre als usuaris sense llicència.

En aquest apartat, descriurem els diferents aspectes econòmics de l'accés dinàmic a l'espectre en una xarxa de ràdio cognitiva. Primer, descriurem el concepte de comercialització de l'espectre radioelèctric, que involucra la venda de l'espectre a usuaris individuals o múltiples i, la compra de l'espectre que realitzen els usuaris sense llicència. Segon, es classificaran els models de comercialització de l'espectre, i per últim, es discutirà els temes de fixació de preus per a la comercialització de l'espectre, així com les qüestions d'autenticació, autorització i comptabilitat en una xarxa de ràdio cognitiva.

### 4.1 Introducció a la comercialització de l'espectre radioelèctric

Generalment, es proporciona la llicència d'accés a l'espectre a un usuari primari o a un proveïdor de servei, a través d'un mercat primari. Quan aquest espectre és inutilitzat, l'usuari primari pot deixar l'espectre a un mercat o a un usuari secundari, el qual demana temporalment l'espectre per a un servei particular. Aquest procés s'anomena *accés dinàmic a l'espectre*. Tal com mostra la figura 12, el Govern assigna les bandes freqüencials a titulars que passen a posseir la llicència d'aquestes. El mercat secundari intervé quan aquestes bandes freqüencials són usades per usuaris que no tenen llicència.





**Figura 12. Comercialització de l'espectre radioelèctric entre el mercat primari i el mercat secundari**

En termes econòmics, la comercialització de l'espectre (*spectrum trading*) és definit com un procés d'intercanvi de serveis en el mercat. Aquest procés pot ser format a través d'un intercanvi directe d'aquests serveis o, a través d'un intercanvi intermedi, el qual inclou el diner. En aquest cas, l'*spectrum trading* és definit com un procés de compra i venda dels recursos de l'espectre (bandes freqüencials, ranures de temps...).

#### 4.1.1 Estructures de l'*spectrum trading*

A continuació s'expliquen dues grans estructures en la comercialització de l'espectre (*spectrum trading*):

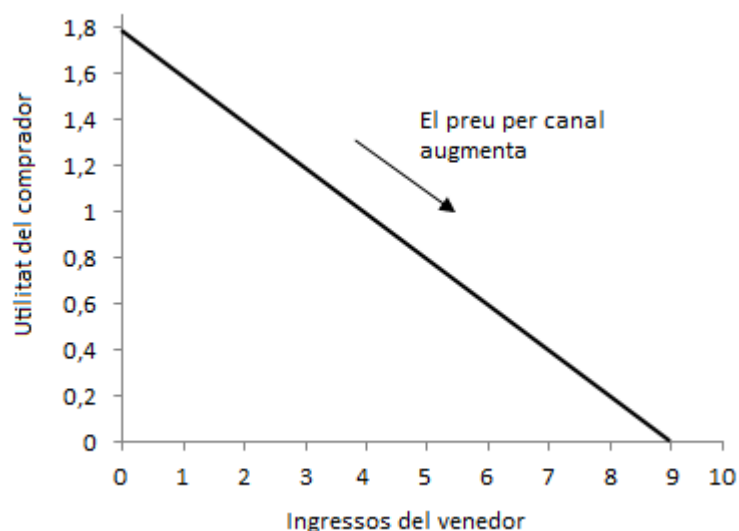
- *Venedor únic - monopoli*: en aquest cas, hi ha un únic venedor en el sistema i això es coneix com a un mercat monopoli. En aquest mercat, un venedor pot maximitzar els seus ingressos donada la demanda dels compradors. En aquest cas, els compradors poden o competir o cooperar per comprar l'espectre del venedor. Aquest comportament dels compradors (és a dir, la competició o la cooperació) afectarà als ingressos del venedor, i farà que aquest adapti la negociació d'acord amb aquest comportament.

- *Múltiples venedors - oligopoli*: en aquest cas, hi ha múltiples venedors oferint l'espectre radioelèctric al mercat i això es coneix com un mercat oligopoli. El comprador té l'opció d'elegir la millor oferta per maximitzar la seva satisfacció, tant en el rendiment com en el preu. Des de que existeix una competició entre venedors, el profit d'un venedor és sempre menys que en el cas de un únic venedor.

En l'*spectrum trading* no hi pot haver un venedor permanent. En aquesta estructura de comerç de l'espectre, tots els usuaris tenen el dret d'accedir a l'espectre. Però, si un usuari particular (com per exemple, un usuari llogat) requereix tenir un compartiment espectral més que un altre (com per exemple, un usuari d'arrendament financer), aquest últim necessitarà ser compensat. És a dir, l'usuari llogat haurà de proporcionar un incentiu al l'usuari d'arrendament financer, com pot ser l'accés a l'espectre amb un dret especial per un cert període de temps. Llavors, quan és necessari, l'usuari d'arrendament financer pot usar aquest incentiu per a accedir a l'espectre com un usuari llogat amb drets especials, mentre que un altre usuari es converteix en usuari d'arrendament financer.

#### **4.1.2 Objectius de l'*spectrum trading***

En l'*spectrum trading*, l'objectiu d'un venedor és maximitzar els ingressos, mentre que el del comprador és maximitzar l'ús de l'espectre. Però, aquest objectius, generalment xoquen entre si. Aquest efecte es mostra a la figura 13.



**Figura 13. Ingressos d'un venedor de l'espectre radioelèctric versos la utilitat d'un comprador de l'espectre**

Quan el venedor incrementa el preu per aconseguir més profit, la utilitat del comprador disminueix a causa de l'elevat cost. Per tant, és necessari una solució òptima i estable per la comercialització de l'espectre radioelèctric en termes d'assignació de preus i d'assignació de l'espectre, de manera que els beneficis i la utilitat siguin maximitzats mentre que, tant el venedor com el comprador estiguin satisfets.

Quan es desenvolupa un model d'*spectrum trading*, han de ser considerats els següents tres aspectes:

- *La forma*: la forma es refereix al canvi de propietat de l'espectre i el canvi d'ús (per exemple, les diferents tecnologies d'accés sense fils) quan es produeix la comercialització de l'espectre radioelèctric. Després de que es realitzi l'*spectrum trading*, la propietat de l'espectre es transfereix del venedor al comprador de l'espectre corresponent (és a dir, es fa el canvi de propietat de l'espectre).

- *Extensió*: defineix els drets i obligacions dels propietaris de l'espectre radioelèctric, els quals hauran de ser transferits als compradors. Aquesta transferència pot ser completa o compartida. En una transferència completa, tots els drets i obligacions d'accés a l'espectre són completament transferits al

comprador. En canvi, en el cas de la transferència compartida, tant el propietari com el comprador comparteixen els drets i les obligacions.

- *Durada*: la durada determina la longitud de temps en que l'*spectrum trading* pot ser accedir per un comprador. Existeixen diferents escales de temps: (1) contracte d'arrendament a curt termini, (2) contracte d'arrendament a llarg termini, (3) de venda i de recompra i, (4) permanent. Si bé la durada del contracte d'arrendament a curt termini pot ser un parell d'hores, la d'arrendament a llarg termini podria ser un parell de mesos.

Per al cas de venda i de recompra, l'espectre es pot vendre i comprar de nou per un propietari de l'espectre, si s'exigeix. En el cas permanent, l'espectre està permanent venut a un comprador. Aquest comprador pot accedir a l'espectre fins que caduqui la llicència.

#### 4.1.3 Tècniques aplicables a l'*spectrum trading*

Existeixen diferents tècniques que poden ser aplicades per dissenyar un model d'*spectrum trading*, amb la finalitat d'obtenir una òptima i estable solució pels venedors i compradors de l'espectre radioelèctric [15].

- *Enfocament microeconòmic*: la teoria de la microeconomia pot ser usada pel model de comercialització de l'espectre (*spectrum trading*) en una xarxa de ràdio cognitiva amb dos entitats (comprador de l'espectre i venedor de l'espectre). La solució d'aquest enfocament es basa en l'equilibri de mercat, el qual dóna el preu i la mida de l'espectre assignat perquè la demanda de l'espectre sigui igual a la oferta. En l'equilibri de mercat, el profit del venedor i la satisfacció del comprador són maximitzades.

- *Enfocament d'optimització clàssic*: l'*spectrum trading* pot ser formulat com un problema d'optimització que consisteix en un únic objectiu sota un conjunt d'obligacions. L'objectiu pot ser, per exemple, maximitzar el benefici d'un propietari o maximitzar la utilització d'un usuari de ràdio cognitiva i, en conseqüència, es produeix la degradació de rendiment dels usuaris primaris a

causa de la compartició de l'espectre o interferències causades als principals usuaris.

- *Enfocament del "joc" de la negociació*: aquest enfocament pot ser utilitzat en situacions on entitats de ràdio cognitiva poden cooperar i cada entitat pot influenciar l'acció d'altres entitats durant la comercialització de l'espectre radioelèctric. En aquest "joc" de negociació, les entitats del sistema poden negociar i regatejar amb els altres de manera que es pugui obtenir una eficient i justa solució.

- *Enfocament de subhasta*: un eficient enfocament del comerç de l'espectre és la subhasta. En un procés de subhasta, els compradors presenten les seves ofertes de l'espectre i, el guany d'un venedor d'espectre es maximitza mitjançant l'assignació d'espectre als compradors que presenten l'oferta de preus més alts.

### 4.3 Classificació de l'spectrum trading

Com es mostra a la figura 14, la comercialització de l'espectre radioelèctric es classifica segons diferents criteris [16]:

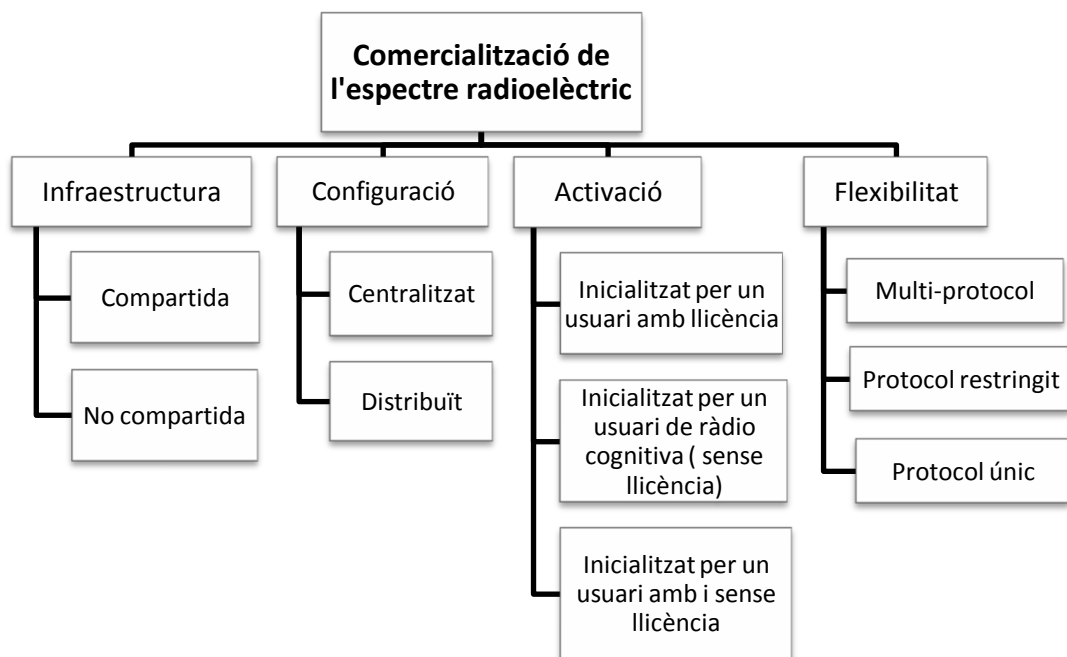


Figura 14. Classificació de la comercialització de l'espectre radioelèctric

- *Infraestructura*: l'espectre obtingut de la negociació, pot ser usat per a una infraestructura compartida o no compartida. En el cas de la infraestructura compartida, els usuaris sense llicència comparteixen el mateix equipament, mentre en el cas d'una infraestructura no compartida, cada usuari sense llicència usa el seu propi equipament.

- *Configuració*: la comercialització de l'espectre radioelèctric pot ser centralitzat o distribuït. En el cas de centralitzat, s'usa un Agent de l'espectre per controlar el comerç (com per exemple, l'arrendament de la durada i dels preus) i els paràmetres de transmissió (potència de transmissió, etc.). En el cas distribuït, cada usuari sense llicència negocia amb un usuari amb llicència per a la comercialització de l'espectre radioelèctric de forma independent. Amb aquest model distribuït, l'usuari sense llicència pot cooperar o competir per comprar l'espectre d'un usuari amb llicència.

- *Activació*: l'*spectrum trading* pot ser inicialitzat per un usuari amb llicència mitjançant l'observació de les oportunitats del seu espectre. En aquest cas, un usuari amb llicència envia una petició a un grup d'usuaris sense llicència informant la seva intenció de vendre l'espectre.

La comercialització de l'espectre, també pot ser inicialitzat per un usuari sense llicència [17]. En aquest cas, la sol·licitud s'envia als usuaris amb llicència, i aquests usuaris amb llicència s'uniran a la comercialització de l'espectre radioelèctric.

L'*spectrum trading* també pot ser inicialitzat pels dos costats. L'activació de la comercialització de l'espectre pot ser periòdic o esporàdic. En la comercialització periòdica, l'espectre és objecte de comerç durant un interval de temps fixat. Per altre banda, en el cas del comerç esporàdic, la comercialització de l'espectre pot ser inicialitzat en qualsevol moment. Això es mostra a la figura 15.

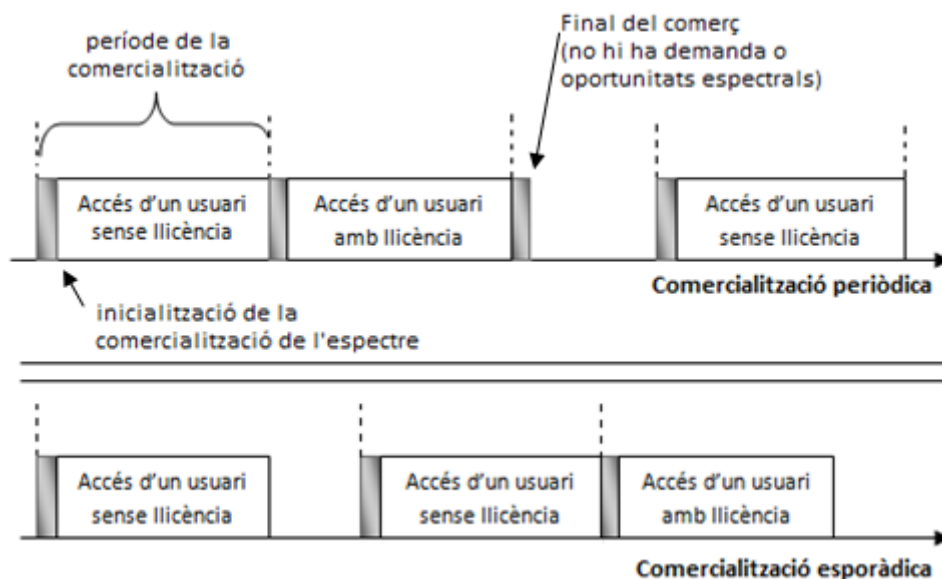


Figura 15. Comercialització periòdica i esporàdica de l'espectre

- *Flexibilitat:* per a la comercialització de l'espectre, el tipus de servei sense fils i tecnologia pot ser especificat. Un usuari amb llicència pot determinar un protocol específic o una varietat de protocols que un usuari sense llicència pot utilitzar. Per altre banda, en el cas de multi-protocol, no hi ha restricció en el protocol per ser usat per un usuari sense llicència.

Un altre criteri de classificació pot ser depenent de si *l'spectrum trading* es realitza en temps no real o real [18]. En el primer, el comerç de l'espectre és realitzat abans de que l'espectre sigui necessari o accedit per un usuari sense llicència. Per altre banda, en el cas de temps real, la comercialització de l'espectre es realitza en base a la demanda. En general, la durada de la comercialització de l'espectre radioelèctric en temps no real és de diversos mesos, mentre que la negociació en temps real és molt més curt (per exemple, poc dies o hores).

#### 4.4 Gestió de la informació

La gestió de la informació és un tema important en el comerç de l'espectre. Cada un dels compradors i venedors ha de determinar la informació que necessita

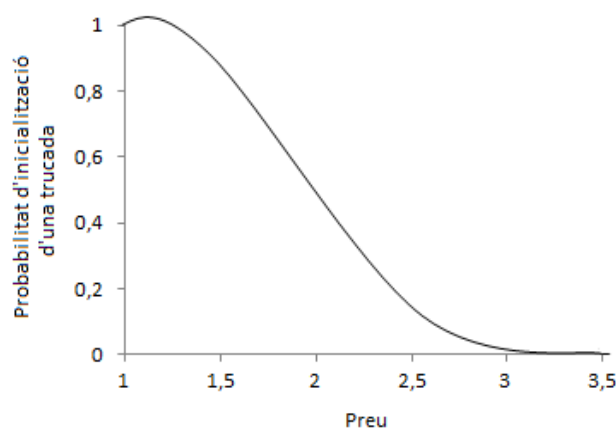
ser intercanviada entre cadascú. Els fluxos d'informació per la comercialització de l'espectre inclouen el següent:

- *Missatges de sol·licitud i reconeixement de la comercialització de l'espectre dels usuaris amb i sense llicència:* aquests missatges contenen els detalls d'una demanda de l'espectre (és a dir, des de la perspectiva del comprador) i de l'oferta de l'espectre (des de la perspectiva del venedor) per l'accés a l'espectre així com informació sobre els preus.
- *Paràmetres d'accés a l'espectre:* aquesta informació és determinada per un usuari amb llicència com informació pública. Aquests conjunt de paràmetres seran usats per un usuari sense llicència per a accedir a l'espectre.
- *Informació de l'ocupació de l'espectre:* un usuari amb llicència utilitza aquesta informació per determinar la sol·licitud de l'espectre el qual serà venut a un usuari sense llicència. Aquesta informació pot ser també recollida per un usuari sense llicència per identificar les oportunitats espectrals i inicialitzar el comerç.
- *Informació sobre l'accés a l'espectre:* aquesta informació pot ser generada tant per un usuari amb o sense llicència per ser usada per un usuari amb llicència. Aquesta ha de contenir informació de la utilització de l'espectre i el nivell d'interferència causada a l'usuari legítim.

## 4.5 Preus del recurs ràdio

L'estudi sobre els preus que s'han d'aplicar a una xarxa cel·lular tradicional depenen tant del venedor com de l'usuari que compra. Per exemple, si el preu elegit per un proveïdor de servei és més elevat que el preu normal, l'usuari cel·lular serà reciten per iniciar la trucada. Com a resultat, la inicialització de la trucada és retardada amb l'expectació d'un usuari de que el preu, en un futur, disminueixi. En particular, tal com es veu a la figura 16, la probabilitat d'inicialització de la trucada es redueix a mesura que augmenta el preu [19].





**Figura 16. Probabilitat d'inicialització d'una trucada respecte el preu**

En una xarxa de ràdio cognitiva, la fixació dels preus del recurs ràdio és una mica diferent a la d'una xarxa de ràdio tradicional, a causa de la compartició de l'espectre i l'adaptabilitat dels usuaris sense llicència per a l'accés a l'espectre. Aquest preu pot ser ajustat dinàmicament d'acord amb les oportunitats de l'espectre que té el venedor i la demanda dels usuaris sense llicència.

Aquesta demanda depèn del número actual de sessions en curs i aplicacions usades pels usuaris sense llicència. Per donar suport a un esquema de preus segur, es requereix un mecanisme d'autenticació per verificar els usuaris que volen accedir a l'espectre, un mecanisme d'autorització per donar l'accés als usuaris a l'espectre i, un mecanisme de comptabilitat per registrar les estadístiques d'utilització i calcular el preu que s'ha d'aplicar als usuaris.

#### **4.6 Autenticació, Autorització i Comptabilitat en la comercialització de l'espectre**

Per garantir un comerç espectral segur, es requereix un esquema d'Autenticació, d'Autorització i Comptabilitat (AAC). L'estructura AAC necessita donar suport a el intercanvi d'informació i negociació entre usuaris amb i sense llicència. També, en una xarxa de ràdio cognitiva, aquest esquema ha de ser dissenyat considerant el fet que les comunicacions entre els usuaris sense llicència

no han de ser plenament controlades per un usuari amb llicència. Es requereixen mecanismes per gestionar la transmissió dels usuaris sense llicència així com prevenir l'accés a l'espectre no autoritzat.

En [5] es va proposar un esquema AAC pels sistemes de ràdio cognitiva, pel qual un usuari sense llicència compra l'espectre ràdio d'un sistema amb llicència. L'arquitectura d'aquest esquema AAC es mostra a la figura 17. En el sistema amb llicència, hi ha un *Centre Polític de Gestió* per gestionar l'accés a l'espectre a un usuari sense llicència. Aquest Centre Polític de Gestió, està format per un *Servidor d'Autenticació*, una base de dades de l'usuari, un *Manager de Banda*, i un *Servidor de Comptabilitat*.

L'esquema AAC treballa seguint el següent: primer, el *Servidor d'Autenticació* verifica un usuari sense llicència. Llavors, el *Manager de Banda* assigna l'espectre disponible a un grup d'usuaris sense llicència autoritzats. A cada estació base d'un sistema amb llicència, s'instal·la un *Agent* per rebre i enviar missatges de control entre el *Centre Polític de Gestió* i uns usuaris sense llicència. També, aquest *Agent* controla l'ús de l'espectre i, informa al *Manager de Banda* si és necessari.

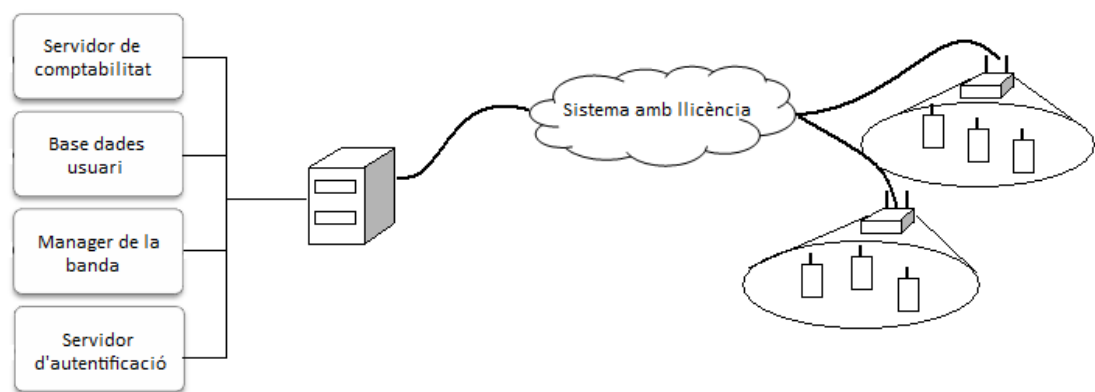


Figura 17. Esquema AAC

Múltiples usuaris sense llicència poden ser agrupats junts. Un *Delegat d'Equip* és usat com a representatiu dels usuaris sense llicència en el mateix grup. Aquest *Delegat d'Equip* negocia amb el *Servidor d'Autenticació* a través d'un canal de control de seguretat. Després de que el *Servidor d'Autenticació* hagi autoritzat l'accés, els usuaris sense llicència són informats d'aquesta autorització a través del

*Canal de Control*. L'esquema AAC, utilitza un mètode d'autenticació, en el qual un grup d'usuaris sense llicència té un parell de claus pública/privada. Quan un usuari sense llicència vol accedir a l'espectre, el *Delegat d'Equip* d'aquest usuari sense llicència envia un missatge de sol·licitud, el qual és encriptat per una clau pública pel *Servidor d'Autenticació*. Llavors, un algoritme d'autenticació desxifra el missatge de sol·licitud usant la clau privada i verifica la informació del missatge. Després de l'autenticació, el *Servidor d'Autenticació* contacta amb el *Manager de Banda* per verificar l'estat de l'ús de l'espectre, i assigna l'espectre lliure als usuaris sense llicència.

#### 4.7 Sumari

En aquest capítol s'ha analitzat la comercialització de l'espectre radioelèctric a les xarxes de ràdio cognitiva (*spectrum trading*). En concret, s'ha fet una explicació acurada d'aquest concepte. Primer de tot, s'han descrit els objectius principals i en conseqüència, les tècniques que es poden aplicar per optimitzar aquest objectiu, que no són res més que optimitzar els beneficis tant dels venedors com dels compradors. A continuació, s'ha fet una classificació de l'*spectrum trading* segons diferents criteris. També, s'ha analitzat la informació mútua que necessita ser intercanviada entre venedors i compradors així com l'estudi dels preus que s'apliquen en una xarxa de ràdio cognitiva. Per últim, s'ha descrit el concepte d'*autenticació, autorització i comptabilitat* que garanteix un comerç espectral segur.

# Capítol 5

## 5 Organismes reguladors i activitats d'estandardització

La ràdio cognitiva obra noves vies a l'espectre radioelèctric pel que, des de un punt de vista dels òrgans reguladors, constitueix a la vegada una oportunitat d'augmentar l'eficiència de l'espectre i també una oportunitat per a la introducció de nous serveis. Al mateix temps, és necessari garantir els drets dels propietaris actuals de l'espectre i per aquest motiu, la introducció en el mercat de la ràdio cognitiva ha de venir acompanyada d'un procés d'estandardització. L'objectiu de l'estandardització és trobar noves formes de gestionar l'espectre, garantir la protecció dels usuaris primaris i dels secundaris i, també investigar sobre les possibles limitacions tècniques que es puguin donar i que puguin dificultar l'existència dels diferents sistemes en una mateixa banda de freqüència.

Respecte a les principals autoritats en l'àmbit de l'estandardització de la ràdio cognitiva, podem destacar:

- *La ITU (Internacional Telecommunication Union)* que va desenvolupar un apartat específic respecte al desenvolupament dels sistemes cognitius.
- *L'ETSI (European Telecommunication Standards Institute)*: el comitè tècnic per a sistemes de ràdio reconfigurables, té l'encàrrec de redactar informes de viabilitat definint quins estàndards relacionats amb la ràdio cognitiva s'han de desenvolupar. En particular, aquest comitè s'encarrega de definir els requisits principals dels propietaris de l'espectre i està organitzat en quatre grups de treball: (1) Aspectes del sistema, (2) Arquitectura de l'equipament ràdio, (3) Arquitectura funcional i canal de control cognitiu i, (4) Seguretat pública.
- *L'IEEE Standards Coordinating Committee 41 (IEEE SCC41)*: es centra en les xarxes cognitives per a l'accés dinàmic a l'espectre. L'objectiu és desenvolupar estàndards per a xarxes cognitives de futura generació.

## 5.1 Activitats d'estandardització

### 5.1.1 IEEE SCC 41

La gestió de l'ús de la ràdio cognitiva inclou molts aspectes econòmics, tècnics i processos d'estandardització. Aquests processos d'estandardització són vitals per al desenvolupament i implementació de la xarxa de ràdio cognitiva. No obstant, fins ara, molts grups de recerca han estat treballant independentment i per tant, els resultats són incoherents. Per resoldre aquest problema, és necessari una coordinació entre els grups de recerca i altres organitzacions [21]. L'IEEE *Standards Coordinating Committee* (SCC)41 ha estat establert per iniciar una sèrie d'estàndards associats, anomenat IEEE 1900 [22].

Els majors components dels estàndards de IEEE 1900 són :

- *IEEE 1900.1*: la major part d'aquest estàndard serveix per identificar i explicar un glossari de termes i conceptes relacionats amb la gestió de l'espectre de la ràdio adaptativa, i altres tecnologies. A més, aquest estàndard s'utilitza com a connexió amb altres grups de treball IEEE SCC 41, ja que tots aquests grups s'hauran de basar en les definicions que declari aquest estàndard.
- *IEEE 1900.2*: aquest estàndard relata la pràctica recomanada per a l'anàlisi d'interferències. En la ràdio cognitiva, molts dispositius i serveis tenen permís per coexistir al mateix lloc i al mateix moment. Optimitzar els paràmetres d'operació d'aquests dispositius i serveis és un tema crucial per eliminar les interferències. L'estàndard IEEE 1900.2 recomana el criteri per l'anàlisi de les interferències.
- *IEEE.1900.3*: aquest estàndard avalua els mòduls de software en la ràdio definida per software. L'objectiu principal d'aquest estàndard és garantir la coexistència i el compliment en la part software. Aquest compliment és necessari per validar i certificar els productes de ràdio cognitiva finals.

- *IEEE.1900.4*: aquest estàndard estudia la coexistència de dispositius en el interfície aire. Aquesta coexistència és la funció clau en la nova generació de sistemes sense fils en la qual un dispositiu mòbil serà capaç d'utilitzar múltiples tecnologies sense fils simultàniament.

- *IEEE 1900.A*: la responsabilitat d'aquest grup d'estudi és la certificació de dispositius amb accés dinàmic a l'espectre. El grup d'estudi en centrarà en la fiabilitat i l'avaluació de la normativa de la comunicació entre dispositius sense fils i l'accés dinàmic a l'espectre. Nous mètodes i proves necessiten ser desenvolupades per garantir que aquests dispositius no interfereixin amb la transmissió dels dispositius amb llicència.

### 5.1.2 Altres estàndards IEEE

Existeixen altres projectes/estàndards IEEE que es refereixen a la ràdio cognitiva com per exemple el IEEE 802.18,19,21 i 22.

*IEEE 802.18*: L'IEEE 802.18 és un grup d'assessorament tècnic responsable de la pràctica i el seguiment de l'evolució de les activitats reguladores de la ràdio en diferents projectes (per exemple, per el IEEE 802.11 WLAN, IEEE 802.15 WPAN, IEEE 802.16 WMAN, IEEE 802.20 Mobile WMAN, i IEEE 802.22 WRAN). Aquest IEEE 802.18 ha de fer comentaris i recomanacions als reguladors i per informar de qualsevol demanda de l'accés a l'espectre.

*IEEE 802.19*: L'IEEE 802.19 és un grup d'assessorament tècnic per a la coexistència. Aquest grup s'ocuparà dels temes de la coexistència entre xarxes sense fils sense llicència sobre la base dels estàndards IEEE 802 (per exemple, IEEE 802.11 i Bluetooth). En aquest cas, quan sigui introduït un nou estàndard per a xarxes sense fils sense llicència, aquest grup IEEE 802.19 revisarà la garantia de coexistència d'aquest estàndard per assegurar que el nou estàndard pugui coexistir amb les tecnologies existents operant en el mateix espectre.

*IEEE 802.21*: L'IEEE 802.21 és un nou estàndard per donar suport a la gestió de la mobilitat per a les tecnologies sense fils. Aquest, serà un estàndard

fonamental per la següent generació de sistemes sense fils en que un usuari mòbil podrà utilitzar a la vegada múltiples tecnologies sense fils.

*IEEE 802.22:* L'IEEE 802.22 és una nova tecnologia sense fils per donar suport a la comunicació de dades en una gran àrea de cobertura. Aquesta tecnologia opera en bandes de televisió les quals estan sense ocupar. Però, per garantir que el titular del servei no sigui interferit amb dispositius IEEE 802.22 s'aplicarà l'accés dinàmic a l'espectre. Aquest estàndard s'estudiarà en detall al capítol 5.

## **5.2 Sumari**

En el capítol present, s'han mencionat la importància del procés d'estandardització de la ràdio cognitiva per poder garantir els drets de tots els usuaris. Per això s'ha mencionat els principals organismes reguladors de la ràdio cognitiva (ITU, ETSI, IEEE, etc) i, s'ha fet un recull dels processos d'estandardització més significatius.



# Capítol 6

## 6 Introducció de la ràdio cognitiva a les bandes de televisió

Per a que la ràdio cognitiva sigui una realitat, hi ha dues coses importants. La primera, és el canvi que s'ha de realitzar en el reglament de l'ús de l'espectre. La segona és fer noves normes a tot el món per coordinar la utilització de l'espectre i introduir la ràdio cognitiva en les noves aplicacions.

No tots els serveis de telecomunicacions poden beneficiar-se de la tecnologia de ràdio cognitiva per igual. Aplicar la ràdio cognitiva a bandes de telefonia mòbil és més complex que fer-ho a les bandes de televisió, ja que el comportament és més dinàmic, transmeten de forma discontinua i les trucades es poden produir en qualsevol lloc del territori sempre que hi hagi cobertura.

Per això, el que s'està estudiant és introduir la ràdio cognitiva a les bandes de televisió, ja que aquesta emet de forma regular i en horaris definits, i per tant, és molt més fàcil utilitzar els espais en blanc del seu espectre.

La Comissió Federal de Comunicacions d'EEUU (*FCC*) va emetre el primer informe en el 2006 [23], estudiant la possibilitat de permetre l'accés sense fils en les bandes de televisió als dispositius fixes i mòbils sense llicència. El primer estàndard basat en l'ús de la ràdio cognitiva per a les bandes de televisió ha sigut l'IEEE 802.22, que ja es troba operatiu als Estats Units i que subministra serveis de banda ampla a les zones rurals.

A Europa, diversos organismes reguladors, com l'OFCOM (*UK Office of Communications*) a Gran Bretanya o l'European Telecommunication Standard Institute (ETSI) i, altres països com Canadà, Holanda, Finlàndia i Escòcia, estudien la viabilitat d'aplicacions similars i han desenvolupat regles sobre l'ús secundari dels espais en blanc de les bandes de televisió en els seus respectius àmbits.

En aquest apartat, farem una revisió detallada sobre la reglamentació i les activitats d'estandardització de la ràdio cognitiva en el món.

## 6.1 Estats Units. FCC

Els dispositius de banda ampla que poden operar en les bandes de televisió de forma oportunista, és a dir, sense llicència, estan classificats per la FCC en dues categories: dispositius “personals/portàtils” i dispositius “fixes”.

La primera classificació en general són dispositius de poca potència, tals com les targetes Wi-Fi en els ordinadors portàtils o la xarxa d'àrea local sense fils. La segona classificació, són els dispositius, de major potència, que són generalment operats des d'una ubicació fixa i que poden oferir serveis comercials, tal com l'accés a Internet de banda ampla sense fils.

La FCC permet ambdós tipus d'operacions en l'espectre de televisió, sempre que s'adoptin mesures apropiades per a garantir que les operacions es limitin als canals de televisió sense usar.

La FCC també va proposar diferents requisits per evitar interferències per a aquests dos tipus de dispositius sense llicència. Aquestes propostes han de permetre flexibilitat per donar un rang ample d'aplicacions de banda ampla als dispositius sense llicència, i al mateix temps, garantir mecanismes adequats i eficaços per limitar l'ús d'aquests dispositius sense llicència a operar als canals de televisió que no s'utilitzin.

## 6.2 Canadà

Canadà és un país molt gran amb baixa densitat de població. Com a resultat, hi ha molts canals de televisió vacants (no assignats), especialment en les zones rurals. Canadà està molt interessat en l'ús cognitiu de l'espectre que s'usa per la televisió. S'han fet passos per obrir un subconjunt dels canals de televisió per a donar accés de banda ampla a les zones rurals i remotes en la banda UHF sota el funcionament d'operacions amb llicència [24].

Les emissores de televisió són les principals usuàries i qualsevol nou servei sense fils ha d'operar en una base secundària. Només els sistemes punt a multipunt estan permesos en aquest moment. Les aplicacions són típicament serveis de banda ampla. Per protegir els serveis de radiodifusió existents, qualsevol servei secundari ha de ser operat a una distància suficient dels principals centres de població.

L'enfocament de Canadà es basa en un ús secundari de la llicència, pel que és diferent de les regles d'ús de la FCC. L'espectre i tipus de servei són planificats de forma individual i coordinats al voltant dels serveis de televisió. Els usuaris secundaris, se'ls permet usar estacions base amb més potència (fins a 500W de PIRE (*Potència Isotròpica Radiada Equivalent*)).

Principals diferències entre Estats Units i Canadà:

1) Estats Units ha proposat que les operacions que es realitzin sense llicència es facin a baixa potència, mentre Canadà ha adoptar una llicència d'alta potència per servir àrees més grans.

2) A Estats Units la protecció dels usuaris principals es basa en evitar interferències dinàmiques, mentre que a Canadà, les freqüències són assignades pel govern cas per cas per evitar interferències.

3) A Estats Units les operacions estan fixades per proporcionar serveis de banda ampla sense fils a les zones rurals i urbanes, o dispositius portàtils/personals per proporcionar una xarxa sense fils a les llars similar a Wi-Fi, mentre que a Canadà només els dispositius fixes estan permesos per proporcionar serveis de banda ampla a les zones rurals.

### **6.3 Regne Unit. OFCOM**

Al febrer de 2009, l'OFCOM va llençar una proposta que permet l'accés cognitiu sense llicència a l'espectre [25] [26]. Basat en aquesta proposta, una gama amplia d'aplicacions tals com l'alta velocitat en la banda ampla, pot ser aplicat

mitjançant els espais blanc de la televisió. Per a l'ús de l'espectre, els dispositius cognitius han de garantir que els usuaris amb llicència estiguin protegits contra interferències perjudicials.

L'OFCOM va suggerir tres mètodes per a l'accés cognitiu: sensat, localització geogràfica i balises. L'OFCOM reconeix que els tres enfocaments tenen diferents avantatges i desavantatges.

El sensat és analitzar les senyals en els canals d'interès per identificar els canals ocupats. Té la capacitat de fer un ús més eficient dels espais en blanc, però el problema del terminal ocult pot donar lloc a alguna possibilitat d'interferència.

La localització geogràfica necessita una base de dades, tenir la capacitat d'auto-localització pels dispositius i, actualitzar freqüentment la base de dades dels titulars amb llicència per a l'ús eficaç dels espais en blanc.

El mètode de les balises consisteix en un petit emissor integrat en els micròfons sense fils que emet aquestes balises per “donar-se a conèixer” en el canal que estan. Les balises requereixen una infraestructura de transmissió i necessiten una base de dades per guardar la informació que s'ha de transmetre. En l'actualitat l'OFCOM pensa que el mètode de les balises és menys eficaç en comparació els altres dos, pel que no es considera en aquest moment.

## 6.4 IEEE 802.22

L' IEEE 802.22 és el primer estàndard mundial basat en la tecnologia CR. Es pretén que sigui un estàndard per a xarxes sense fils d'àrea regional (WRAN, *Wireless Regional Area Network*) que utilitzi tècniques cognitives de ràdio per permetre l'ús compartit de bandes UHF/VHF de televisió. El seu objectiu és portar l'accés de banda ampla als llocs on és difícil arribar a causa de la baixa densitat de població com per exemple, les zones rurals.

Un dels principals reptes de l'estàndard IEEE 802.22, és detectar la disponibilitat d'espectre (la presència/absència de senyal dels titulars) de forma ràpida i, canviar dinàmicament els paràmetres de transmissió per tal de no causar interferències perjudicials als titulars del servei de televisió i als dispositius amb llicència de baix consum d'energia, com ara, els micròfons sense fils.

### 6.4.1 Preliminars de l'IEEE 802.22

L'objectiu principal del l'estàndard IEEE 802.22 és donar accés de banda ampla a les àrees rurals, amb un rendiment comparable a les tecnologies ja existents de banda ampla (per exemple, l'ADSL). Un exemple és als Estats Units, on gairebé la meitat de la població es concentra a les zones rurals. Per tant, això a donat lloc al desenvolupament de noves tecnologies que augmenten la disponibilitat de l'accés de banda ampla a aquests mercats.

De fet, l'accés a la banda ampla a les regions rurals és una de les raons per les quals la FCC ha seleccionat les bandes de televisió per donar tal servei, ja que aquest espectre, baix de freqüència, té unes característiques de propagació molt favorables que permeten de sobres oferir serveis als usuaris i per tant, oferir un negoci pels proveïdors. A més, molts canals de televisió estan sense ocupar en moltes parts dels Estats Units [27].

Finalment, però no menys important, un altre avantatge afegit és que els dispositius 802.22 en les bandes de televisió, seran sense llicència, el que redueix encara més els costos i afavoreix la prestació d'un servei més econòmic. Això no vol dir però, que aquest estàndard es limiti a les zones rurals i remotes. De fet, altres mercats clau que volen abordar en un futur les xarxes 802.22 WRAN inclouen habitatges unifamiliars, petites oficines, petites empreses, campus públics i privats, etc. Per tant, el sistema 802.22 està definit en tal lloc que podria ser usat tant en medis urbans com rurals.

#### **6.4.2 El sistema de l'IEEE 802.22**

L'objectiu principal de l'IEEE 802.22 és definir un estàndard internacional que pugui operar a qualsevol règim regulatori (per exemple, als Estats Units, Canadà, Europa, Japó, Austràlia, etc.) Per tant, el projecte actual 802.22 identifica la freqüència d'operació d'Amèrica del Nord, des de 54 Mhz a 862 Mhz, mentre que s'està portant a terme estendre el rang operatiu de 41 Mhz a 910 Mhz per complir amb els requisits dels reguladors internacionals. A més, atès que no hi ha uniformitat a tot el món sobre la canalització dels serveis de televisió, l'estàndard s'ha d'adaptar als diversos amplituds de banda dels canals de televisió internacionals de 6, 7 i 8 MHz.

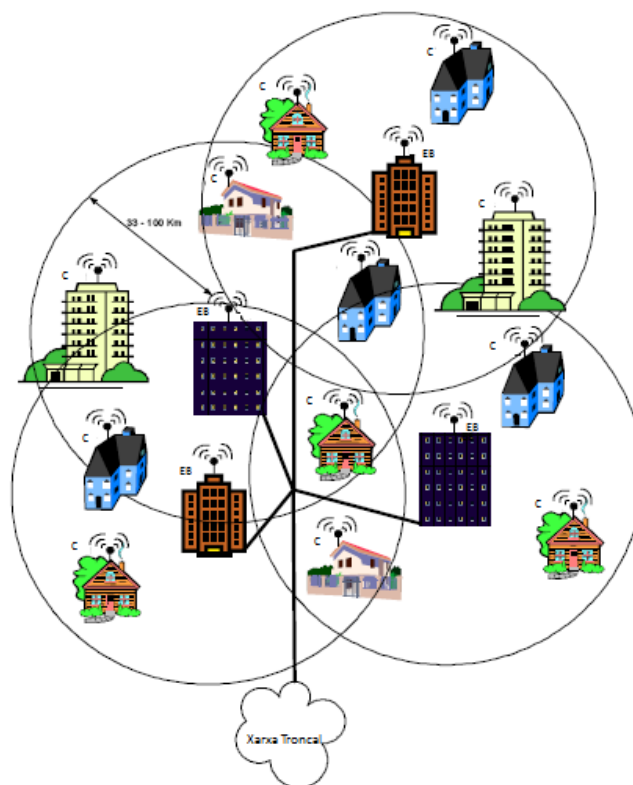
##### **6.4.2.1 Topologia**

El sistema 802.22 especifica un punt a multipunt fix d'interfície aèria sense fils mitjançant el qual una Estació Base (EB) administra les seves pròpies cel·les<sup>1</sup> i tots els Usuaris (U) associats, tal com es mostra la figura 18. L'EB (instal·lada per un professional) controla l'accés al medi en la seva cel·la i transmet en direcció

---

<sup>1</sup> Aquí, es defineix una cel·la 802.22 (o, simplement cel·la) una regió formada per una sola estació base 802.22 i zero o més usuaris associats amb i sota el control d'aquesta estació base. La seva àrea de cobertura s'estén fins al punt on la senyal transmesa per l'estació base 802.22 pot ser rebuda per l'usuari 802.22 associat amb una mínima qualitat de SNR.

descendent a varis Us (que poden ser instal·lats pel mateix usuari), els quals responen a l'EB en direcció ascendent.



**Figura 18. Exemple del subministrament de les estacions bases als usuaris de la mateixa cel·la**

Per tal de garantir la protecció dels serveis existents, el sistema 802.22 segueix una estricta relació mestre/esclau, on l'EB realitza el paper de mestre i els Us són els esclaus. Cap U és autoritzat per transmetre si abans no s'ha rebut l'autorització de l'EB, la qual també controla totes les característiques de radiofreqüència (per exemple la modulació, la codificació i, les freqüències de funcionament) utilitzades pels Us.

A més de la funció tradicional d'una EB, que té per objecte regular la transmissió de dades en una cel·la, una estació base 802.22 té una característica única, la de *distribució de detecció*. Aquesta és necessària per garantir la protecció adequada dels titulars i és administrat per l'EB, la qual indica als Us que realitzin diferents activitats de mesura. En base a la informació rebuda, l'EB decideix quines mesures, si s'escau, s'han de prendre.



#### 6.4.2.2 Capacitat del servei

El sistema 802.22 s'ha definit per a que els usuaris puguin assolir un nivell de rendiment similar al dels serveis d'ADSL disponibles. Això equival a una velocitat descendent o de descàrrega del voltant de 1,5 Mbps i una velocitat de pujada o ascendent de 384 kbps. Per tal d'obtenir la velocitat mínima de dades per a cada U, han de ser considerats un total de 12 usuaris simultanis; per tant, la capacitat global del sistema ha de ser de 18 Mbps en sentit descendent.

Per tal de poder complir aquests requisits es necessita una taxa de transferència de dades de 3 bits/s/Hz per a un canal de televisió de 6 MHz.

#### 6.4.2.3 Àrea de cobertura

L'àrea de cobertura de l'estàndard IEEE 802.22 és molt més gran que molts altres estàndards IEEE 802 existents. Per exemple, 802.11, té una àrea de cobertura de 50 metres en la pràctica, en canvi el rang de cobertura de les xarxes 802.22 WRAN pot arribar fins a 100 Km si no s'urgeixen problemes amb la potència (l'àrea de cobertura actual s'especifica a 33 Km a 4 Watts) i fins a 255 unitats fixes d'instal·lacions d'usuaris.

Degut a l'ampliació de la cobertura que ofereix la utilització d'aquestes freqüències més baixes, els paràmetres de la capa física (PHY, *Physical Layer*) han de ser optimitzats per absorbir l'accés de múltiples retards respecte altres estàndards 802 sense fils. Un retard superior a  $37\mu\text{s}$  pot ser absorbit per la multiplexació ortogonal per divisió de freqüència (OFDM, *Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) de la modulació utilitzada.

Més allà dels 30 Km. per els que la capa PHY ha estat dissenyada, el control d'accés al medi (MAC, *Media Access Control*), absorbirà les demores de propagació addicionals per a distàncies de cobertura de fins a 100 Km.

Com es mostra a la figura 19, les xarxes WRAN tenen una cobertura més àmplia que la resta de xarxes existents, a causa de que posseeixen una potència

superior i unes característiques de propagació significants a les bandes de freqüència de televisió.

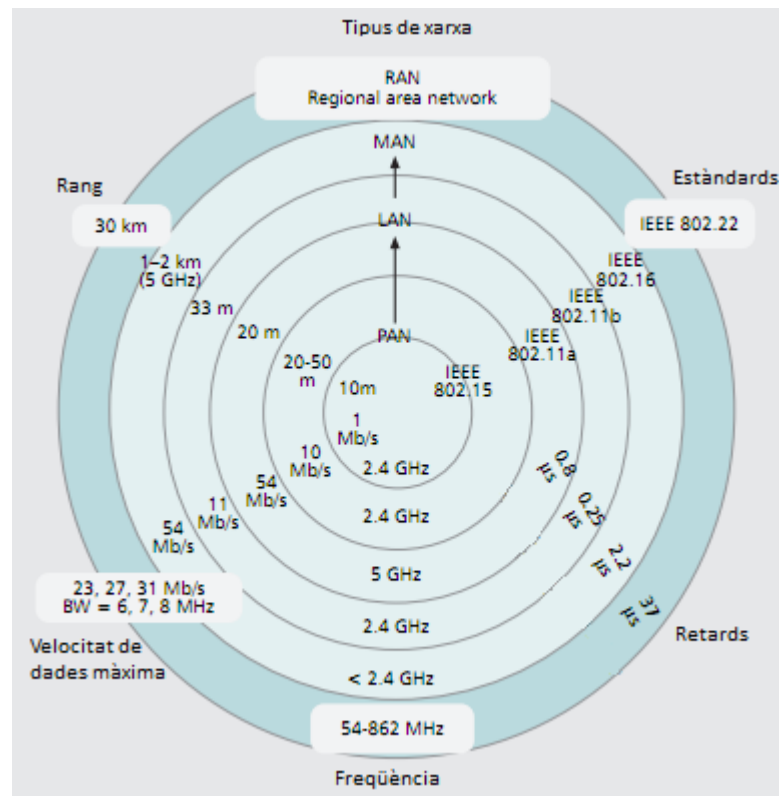


Figura 19. Característiques de l'IEEE 802.22 RAN sense fils i comparació amb altres estàndards sense fils

#### 6.4.2.4 Taula de característiques

La taula 2 recull les característiques principals de l'estàndard IEEE 802.22 que ja s'han mencionat anteriorment.

Paràmetre	Especificació
Radi típic d'una cel·la	30 – 100 Km
Metodologia	Sensat de l'espectre per detectar canals lliures
Ample de banda del canal	6 MHz
Modulació	OFDM
Capacitat del canal	18 Mbps
Capacitat de l'usuari	Descendent: 1,5 Mbps Ascendent: 384 Kbps

Taula 2. Característiques de l'IEEE 802.22

#### 6.4.2.5 Interfície aèria

L'exigència més crítica per a la interfície 802.22 és la flexibilitat i l'adaptabilitat, la qual deriva del fet que 802.22 opera en un espectre on els titulars han de ser protegits per tots els mitjans. A més, el fet que 802.22 opera sense llicència i una EB dóna servei a una gran superfície, la convivència entre les cel·les 802.22, és de gran importància. Per tant, en aquest apartat discutirem el disseny de la capa física i la capa de control d'accés al medi, que han de suportar tant la flexibilitat com l'adaptabilitat, les quals proporcionen els medis per abordar les qüestions de convivència.

##### *La capa física (PHY)*

A la capa física es realitzen tres funcions primàries: la comunicació de dades, la funció de detecció espectral i la funció de geolocalització.

- La detecció espectral és analitzar les senyals en els canals, per identificar els canals que estan ocupats per una transmissió amb llicència. En l'IEEE 802.22, tant l'EB com l'U han de tenir la capacitat de detecció espectral per detectar les tres diferents transmissions amb llicència (la televisió analògica, la televisió digital i dispositius amb llicència de baixa energia, els micròfons sense fils).

L'estàndard estableix els requisits per a la detecció de l'espectre en funció de quatre paràmetres: detecció de la sensibilitat del receptor, temps de detecció del canal, probabilitat de detecció i probabilitat de falsa alarma. Tots els nodes, per a poder realitzar l'activitat de detecció, han d'utilitzar una antena amb un guany d'almenys 0 dBi en totes les direccions. L'antena de detecció ha de ser instal·lada a l'aire lliure, lliure d'obstruccions en la mesura possible i, a una alçada mínima de 10 metres sobre el nivell del sòl.

***Els llindars de detecció***

Ja que l'estàndard 802.22 està pensat per operar en bandes assignades a sistemes de televisió, s'especifiquen els llindars per desocupar un canal davant de la presència d'aquests senyals. L'estació base desocupa un canal si la senyal és detectada per sobre dels llindars següents<sup>2</sup> :

- Televisió digital: -116 dBm a través d'un canal de 6 Mhz. És crucial tenir en compte que el grup de treball 802.22 ha arribat a la conclusió que si el canal N és ocupat per un titular dins del seu contorn protegit, llavors aquest estàndard no funcionarà en els canals  $N$  o  $N \pm 1$ .

- Televisió analògica: -94 dB mesurat en el pic de la portadora NTSC<sup>3</sup>.

- Micròfons sense fil: -107 dBm mesurat en un ampla de banda de 200 KHz.

Els requisits de detecció es mostren a la taula 3.

<b>Sensibilitat del receptor (6 MHz d'ample de banda)</b>	- 116 dBm per la televisió digital -94 dBm per la televisió analògica -107 dBm pels micròfons sense fils
<b>Probabilitat de detecció</b>	90%
<b>Probabilitat de falsa alarma</b>	10%
<b>Temps de detecció</b>	< 2 segons

**Taula 3. Requisits de detecció**

<sup>2</sup> Llindars corresponents a Estats Units.

<sup>3</sup> NTSC (National Television System Committee) és l'estàndard per a sistemes de televisió analògica als Estats Units.

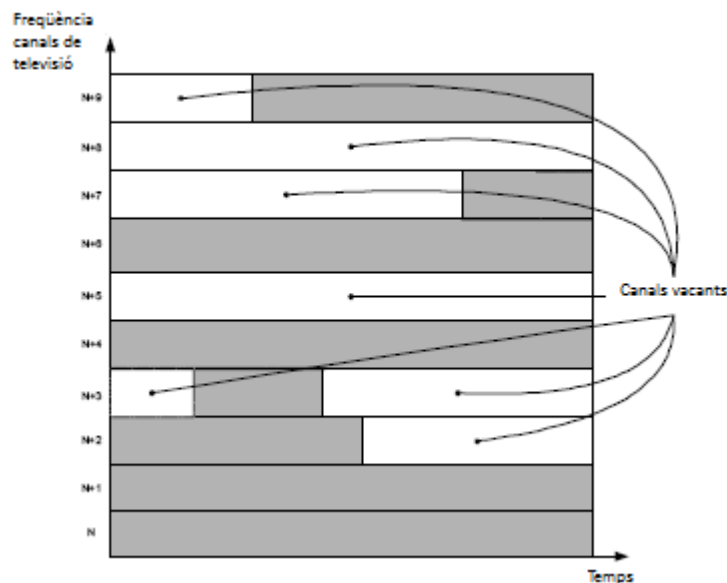
La detecció espectral la realitza tant l'estació base com l'usuari, però la decisió final sobre si un canal està disponible per ser usat ho fa l'estació base. Per tant, l'usuari ha d'informar a l'EB dels resultats de la detecció espectral. A més, la detecció realitzada per l'usuari és controlada a través de missatges de gestió que on s'indica la llista de canals prioritaris a ser detectats durant el temps d'inactivitat de l'usuari o indicant tasques específiques que ha de dur a terme.

La figura 20 mostra un exemple del que podria ser l'ocupació dels canals de televisió en el temps i freqüència. Com podem veure, les possibilitats de transmissió (és a dir, temps durant el que un canal és lliure) per l'estació base i l'usuari, solen experimentar un comportament aleatori que repercuteix en el disseny tant de la capa de control d'accés al medi com en el de la capa física.

En el cas específic de la capa física, aquesta necessita oferir un alt rendiment mantenint la complexitat baixa. Per exemple, si s'adopta un sistema basat en OFDM<sup>4</sup>, el nombre de portadores té un impacte significatiu, així com el cost. Estudis recents revelen que per a obtenir un canal d'esvaniment pla, el nombre de subportadores per canal de televisió hauria de ser superior a dos mil, el que pot augmentar el cost i la complexitat d'un estàndard, en que la principal aplicació és donar accés de banda ampla a zones rurals i remotes. D'altra banda, el rendiment pot ser considerablement més gran.

---

<sup>4</sup> L'OFDM genera una alta taxa de transmissió al dividir el flux de dades en molts canals paral·lels o subportadores i això fa que sigui capaç de recuperar la informació entre les diferents senyals amb diferents retards i amplituds que arriben al receptor, pel que fa que no existeixin problemes d'interferència



**Figura 20. Exemple de l'ocupació dels canals de televisió pels operadors tradicionals en el temps i freqüència**

- **Geolocalització:** En l'IEEE 802.22 es necessita que tots els dispositius de la xarxa estiguin instal·lats en una ubicació fixa i l'EB necessita conèixer la seva ubicació i la ubicació de tots els U associats. La localització de l'EB ha de ser coneguda dins d'un radi de 15 metres, mentre que la ubicació dels Us ha de ser dins d'un radi de 100 metres.

Amb la finalitat de complir amb aquests requisits, tots els dispositius de la xarxa han d'estar equipats amb un satèl·lit basat en la tecnologia de geolocalització (GPS, Galileu, etc). Durant el procediment d'inicialització de qualsevol U nou en la xarxa, la unitat de geolocalització de l'U ha de detectar amb èxit a un número necessari de satèl·lits i, al fer-ho, aquest U ha de determinar amb precisió la seva ubicació abans de que pugui transmetre. Després de que l'U determini la seva pròpia ubicació, pot intentar associar-se a l'EB.

Un altre requisit de l'estàndard 802.22 és que l'EB ha de tenir accés a un servei de base de dades dels titulars. Aquest servei proporciona informació precisa i actualitzada que descriu les emissions protegides que s'estan duent a terme. S'espera que aquesta base de dades no només sigui una base de dades que detalla

les operacions de televisió protegides ni que detalli operacions auxiliars sense llicència, sinó que sigui una base de dades que detalli altres operacions 802.22 en la zona.

Quan un nou U intenta associar-se amb una EB durant la inicialització, l'U envia les seves coordenades d'ubicació de l'EB. A continuació, l'EB usa la informació de la ubicació pel nou U per consultar la base de dades. La latitud i longitud de l'U s'envien a les capes més altes en l'EB. Altres paràmetres de l'U, com l'altura de l'antena i el PIRE, poder ser entregades juntament amb les coordenades de forma que la base de dades dels titulars poden determinar quina serà l'àrea en que l'U interferirà.

Una llista de canals disponibles i els seus respectius PIRE màxims en el que l'U pot funcionar sense que pugui causar interferències en el titular del servei protegit, es genera i es retorna a l'EB. Una xarxa 802.22 té prohibit operar en qualsevol canal, sinó que ha de fer-ho en els canals disponibles que indica la llista o per sobre del màxim nivell de PIRE especificat per qualsevol canal disponible

### ***La capa MAC***

La capa MAC necessita ser molt dinàmica per respondre ràpidament als canvis del medi ambient. A més de proporcionar serveis tradicionals, com el control d'accés al medi, en el cas de l'IEEE 802.22 ha de dur a terme un conjunt totalment nou de funcions per a un funcionament eficaç en el compartiment de les bandes de televisió.

#### ***Inicialització***

Quan s'opera a una banda compartida de forma oportunista tal i com es mostra a la figura 20, la inicialització de l'estació base per accedir a l'espectre no és un procés senzill. Per exemple, en l'IEEE 802.22, cada vegada que un usuari es posa en marxa, pot tenir la necessitat de fer el procés d'escombrat dels canals de televisió durant molt de temps per poder construir un mapa d'ocupació espectral que identifica si a cada canal els operadors titulars s'han detectat o no [28][29].

Aquesta informació també és utilitzada després pel mateix usuari per determinar quins canals estan vacants i per tant, utilitzar-los per buscar EBs.

### *Mesuraments i gestió de l'espectre*

Una part crítica de la capa MAC, que forma una part raonable de les característiques cognitives d'aquest estàndard, són les mesures i la gestió dels canals. Per a que una cèl·lula 802.22 pugui operar sense causar interferències perjudicials als titulars, l'EB ha d'ordenar dur a terme periòdicament les activitats de mesurament als Us associats.

Per tal de determinar la presència de titulars, els dispositius 802.22 necessiten detectar senyals amb nivells de SNR molt baixos i amb certa exactitud, els quals han de ser dinàmicament controlats per l'EB. Atès que aquestes mesures s'han de realitzar a nivells de SNR baix, es suposa que la detecció de senyals de televisió és feta d'una manera no coherent, és a dir, no s'assumeix cap sincronització [30][31].

Durant una activitat de mesura, els Us no poden comunicar-se amb l'EB i això afecta clarament el rendiment del sistema. Com més temps dura una mesura, més gran és la penalització (per exemple, es perd oportunitats d'accés, es consumeix més energia, etc.). Els valors mesurats pels Us es retornen a l'EB que els analitza i pren mesures, si s'escau. Tots aquests aspectes de la durada i la freqüència de l'activitat de la mesura, quin dispositiu(s) ha de mesurar i quin canal(s) per mesurar, formen part del disseny de la capa MAC en l'estàndard 802.22.

La capa MAC del 802.22 també incorpora un ampli conjunt de funcions que li permeten gestionar de forma eficaç l'espectre. Les operacions com ara canviar els canals, suspendre/reprenre el funcionament del canal i, afegir o treure canals, es troben entre moltes accions que la MAC pot adoptar per tal de garantir la protecció dels titulars.

La *gestió espectral* és la funció cognitiva en l'EB que usa les entrades a partir de la funció de detecció de l'espectre (SSF, *Spectrum Sensing Function*), la geolocalització i, la base de dades dels titulars per decidir quin canal de televisió pot ser usat per una cèl·lula WRAN, així com els límits de PIRE imposats per el dispositiu WRAN específic. Aquesta entitat es troba conceptualment a la subcapa



MAC de l'EB, i treballa estretament amb la ruta de dades de la mateixa per comunicar-se amb l'U. Les relacions entre el gestor espectral, l'autòmat espectral i varies entitats cognitives es representen a la figura 21.

Varis passos han de ser adoptats pel gestor espectral per declarar que un canal pot ser utilitzat. La detecció ha de ser realitzada en el canal d'operació (N) i els canals adjacents ( $N \pm 1$ ) per assegurar-se de que cap titular (de televisió analògica o digital o micròfons sense fils amb llicència) estan presents.

Si una operació WRAN del canal N pot crear interferències en una emissió d'un titular operant en un canal associat, el gestor espectral haurà de seguir aquestes quatre opcions:

- Reduir el PIRE de l'U a través de la col·locació d'un límit en el rang de la potència de transmissió per eliminar la interferència en la seva àrea local.

- Si aquesta reducció del PIRE fa que el servei sigui insostenible, s'ha de desestimar a aquests usuaris (és a dir, aquests usuaris necessiten buscar servei en un altre canal del mateix o diferent proveïdor de servei).

- Reduir el PIRE de transmissió de l'EB per eliminar les possibles interferències.

- En molts casos, una reducció del PIRE de l'EB, farà que no funcioni correctament el sistema WRAN amb U distants i, el gestor espectral haurà d'inicialitzar un moviment de canal involucrant a l'EB i a tots els Us associats.

Sempre hi haurà una marxa forçada en l'EB en el cas que es produeixi una inesperada situació d'interferència.

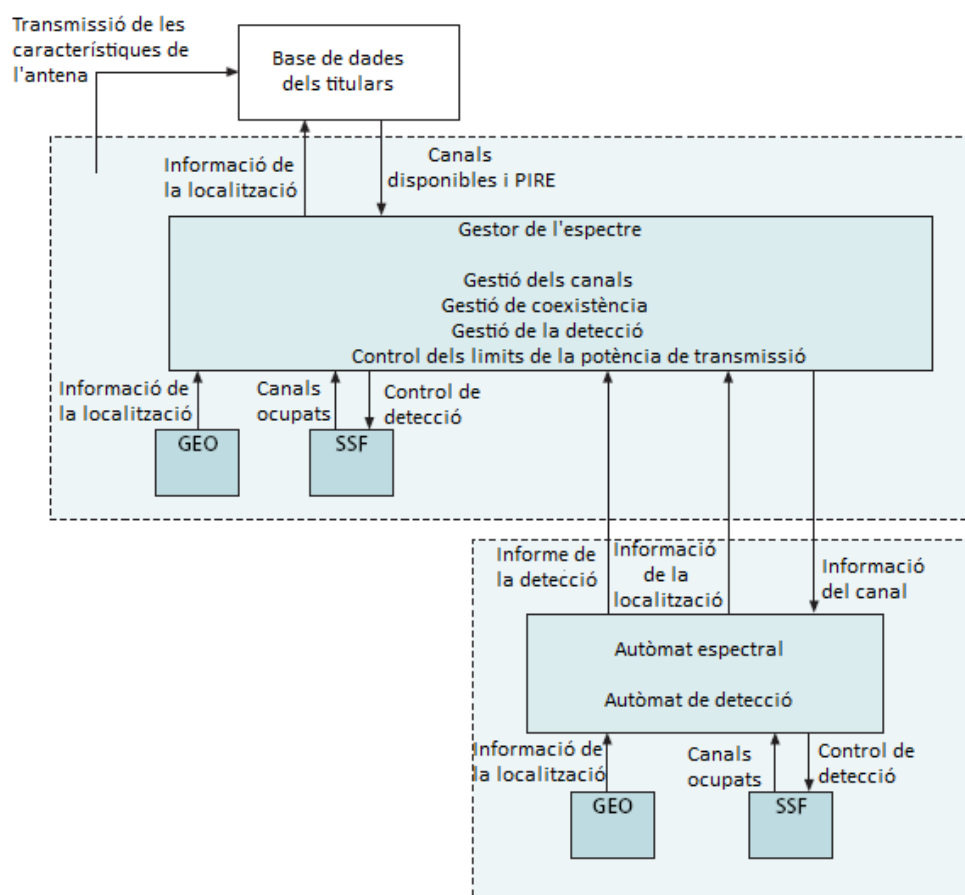


Figura 21. Relació entre la gestió espectral i altres entitats de funció cognitiva

#### 6.4.2.6 Convivència en l'IEEE 802.22

La convivència entre usuaris amb i sense llicència és fonamental per a la interfície aèria 802.22, cosa que, a diferència d'altres estàndards sense fils, està obligat a incloure mecanismes de convivència. Amb aquesta finalitat, les tècniques de ràdio cognitiva s'incorporen al 802.22 per mitjà de la distribució de detecció de l'espectre, els mesuraments, els algorismes de detecció i, la gestió de l'espectre.

Com ja s'ha dit, les bandes de televisió en el que funciona l'estàndard 802.22, ja són usades per radiodifusió de televisió. Per tant, en aquesta secció discutirem en detall l'estat actual de la convivència per protegir aquests titulars, i també les solucions per fer més fàcil la coexistència dels usuaris amb i sense llicència.

**Antenes**

L'objectiu principal de 802.22 és definir una tecnologia que no només presti el seu servei, velocitat i qualitat, sinó també garanteixi que, existint els serveis dels titulars, pugui continuar sent prestat.

Amb aquests dos objectius en ment, es necessita que cada usuari posseeixi dues antenes separades: una direccional i una omnidireccional (amb guany 0 dBi o superior). L'antena direccional seria l'antena operativa usada generalment per l'U per comunicar-se amb l'EB. Les antenes direccionals tenen la característica de que l'energia no s'irradia en direccions no desitjables, pel que la interferència pot ser reduïda al mínim [32]. D'altra banda, l'antena omnidireccional, s'utilitzaria principalment per detectar i realitzar mesuraments. Amb aquesta antena, els Us són capaços de buscar titulars en tot l'entorn, i no només en una única direcció, com seria el cas de l'antena direccional.

***Protecció i detecció de televisió i micròfons sense fils***

En 802.22, tant les EBs com els Us són responsables de la protecció dels titulars, la qual es basa en tècniques cognitives. Atès que les mesures realitzades per un sol U no pot ser completament fiable, l'EB utilitza un mecanisme periòdic de detecció distribuït, que utilitza tècniques com la fusió de dades i referèndums sobre totes les dades mesurades per obtenir una fiabilitat de l'ocupació espectral.

***Temps de resposta***

El temps de resposta és el temps pel qual l'emissió de televisió pot suportar interferències abans de que un sistema 802.22 desocupi el canal. La taxa mínima per detectar una emissió de televisió podria ser d'1 hora i el temps vacant no seria més de 30 minuts, que seria el que necessitaria el mecanisme de detecció distribuït per confirmar la presència d'una operació de televisió digital. No obstant, en el cas

que les estacions de televisió no funcionin de manera contínua (per exemple, apagades durant la nit) es necessita que la detecció sigui molt més ràpida per desocupar el canal quan l'estació de televisió s'encén. En aquest cas, la taxa mínima de detecció podria ser de 5 minuts i el temps de desallotjament, no més d'1 minut.

### ***Taula de l'ús spectral***

Una altra funcionalitat que es requereix pel funcionament de 802.22 és el manteniment d'una taula que classifica els canals segons la disponibilitat, com ara, ocupat (per exemple, per un titular), disponible (per a l'ús de 802.22) i, prohibit (no pot ser utilitzat en absolut pel 802.22). Aquesta taula s'ha d'actualitzar o per l'operador del sistema (per exemple, establint certs canals com a prohibits) o pel propi mecanisme de detecció 802.22.

## **6.5 Sumari**

En aquest capítol, s'ha volgut donar un exemple d'una aplicació ja existent de la ràdio cognitiva: l'ús de la tecnologia CR a les bandes de televisió. Primer de tot, s'ha mencionat el país que té actualment aquesta tecnologia en funcionament (els Estats Units) i altres països on s'està estudiant l'aplicació (Canadà i Regne Unit).

L'estàndard que regula aquesta aplicació és l'IEEE 802.22; per això s'ha aprofundit en el contingut d'aquest estàndard, tenint en compte que el lloc de la seva aplicació, EEUU.

# Capítol 7

## **7 Situació de la ràdio cognitiva Espanya i Europa**

### **7.1 Situació a nivell regulatori**

L'aplicació de la ràdio cognitiva ha de venir acompanyada d'un seguit d'estàndards i normes per al seu òptim desplegament i funcionament. Com s'ha dit al capítol x, alguns països com Estats Units o Canadà, han estudiat la implementació d'aquesta tecnologia al seu país. En aquest capítol, s'explicarà com es troba actualment la ràdio cognitiva als llocs que més ens interessen: a Espanya i Europa.

#### **7.1.1 Situació a Europa**

A Europa s'estan valorant les possibilitats de la ràdio cognitiva i els seus mecanismes d'ús gràcies a grups de treball com SE43 en CEPT (*Conferencia Europea de Correus i de Telecomunicació*) i el grup de treball RSS de l'ETSI. Els estàndards ja desenvolupats o en procés d'estar-ho, tal com l'IEEE 802.22, han de ser modificats per a la seva adaptació a l'entorn europeu en tot allò que te referència amb els nivell de potència i detecció espectral.

Els serveis de seguretat i emergències es troben amb una porció escassa d'espectre. La ràdio cognitiva pot suposar una oportunitat sempre que s'aconsegueixi garantir la presència de forats espectrals en qualsevol ubicació geogràfica.

#### **7.1.2 Situació a Espanya**

A la vista de la situació a Europa, seria desitjable prioritzar a Espanya els següents aspectes relacionats amb les activitats d'estandardització:

- Aprofitar els canals de televisió des del 21 al 68 amb l'objectiu de facilitar l'existència de forats espectrals que poden ser reutilitzats per altres serveis. En aquest sentit, l'existència, com a mínim, d'un canal lliure al llarg de tota la geografia espanyola, no necessàriament en la mateixa ubicació, podria servir per a serveis de seguretat i emergència, complementant les bandes actuals destinades a aquests serveis.
- Posar en marxa l'Agència Estatal de Radiocomunicació, per a centralitzar i reforçar totes les activitats relacionades amb la gestió de l'espectre per aconseguir un ús més eficient de l'espectre radioelèctric, i impulsar la participació espanyola en les activitats d'estandardització internacional.
- Determinar el paper dels operadors primaris en l'ús cognitiu: oportunitats de negoci, ajust dinàmic de la seva potència en funció de l'ús del seu espectre, etc.

## **7.2 Visió jurídica de l'espectre radioelèctric a Espanya**

L'espectre radioelèctric és considerat com un bé de domini públic. D'acord amb la Constitució Espanyola, correspon a la Llei, regular el règim jurídic dels bens de domini públic, que en el cas de l'espectre radioelèctric correspon a la Llei General de Telecomunicacions (LGTel). En la LGTel es defineix que l'espectre radioelèctric és un bé de domini públic, en que la seva titularitat, gestió, planificació, administració i control correspon a l'Estat. Aquesta administració de l'espectre per l'Estat, és deguda a l'escassetat del recurs i per això, els governs tenen la titularitat del recurs.

La LGTel té altres normes com per exemple en la gestió estatal de l'espectre, que estipula que s'ha de realitzar en conformitat amb els Tractats Internacionals, en especial amb la normativa UIT (*Unió Internacional de Telecomunicacions*), en particular en el seu Reglament de Radiocomunicació, que inclou el quadre d'atribució de diferents bandes de freqüència entre els diferents serveis, aconseguint així un equilibri internacional dels usos de l'espectre.

L'ordenació de l'espectre a Espanya està subjecte a altres normes pel fet de ser membre de la Unió Europea, com per exemple la creació d'un comitè d'espectre radioelèctric i la diferenciació entre gestió pública i gestió tècnica del recurs. La primera és refereix a les decisions polítiques respecte a l'ús de l'espectre i la segona es refereix a l'assignació de l'espectre. També s'estableix l'obligació dels Estats membres de la Unió Europea de publicar quadres Nacionals d'Atribució de freqüències.

En el que respecta la normativa interna espanyola, com s'anava exposant, la LGTel s'ocupa d'administrar el recurs i també de portar a terme altres funcions com la de "polícia" de l'espectre, actuant per exemple, en la comprovació de les emissions, en el control de les interferències perjudicials, etc.

A més, la LGTel estableix la creació de l'Agència Estatal de Radiocomunicació com un organisme públic que es troba inscrit al Ministeri de Indústria, Comerç i Turisme (el qual porta a terme la gestió del domini públic radioelèctric).

També s'ha de mencionar que en la LGTel, els operadors i titulars dels drets d'ús públic radioelèctric estan obligats a pagar unes taxes, amb la finalitat de garantir l'ús eficient del recurs. L'encarregada de gestionar aquestes taxes és l'Agència Estatal de Radiocomunicació.

### **7.3 El Mercat Secundari a Espanya**

Les autoritats encarregades de la gestió i administració de l'espectre radioelèctric (la Comissió del Mercat de les Telecomunicacions (CMT) i la Secretaria d'Estat de Telecomunicacions i per a la Societat de la Informació (SETSI)) i admeten que adoptar el Mercat Secundari de l'espectre és un tema complex que presenta alguns riscos ja que, es produiria una fragmentació de l'espectre, es podria donar acaparament i especulació, etc.

Tot i els desavantatges mencionats, els avantatges del Mercat Secundari de l'espectre serien importants: hi hauria una millor eficiència en el seu ús, es



permetria l'aparició de noves operadores i noves tecnologies, s'obtindria més beneficis pels usuaris, hi haurien processos transparents i no discriminatoris, etc.

Hem d'assenyalar que la LGTel inclou disposicions relatives a l'ús del domini públic radioelèctric, el qual permet la transmissió o cessió dels drets d'ús privat del domini públic radioelèctric. Aquesta transmissió del títol o llicència pot ser integra o parcial.

Amb la transmissió parcial es dona el dret a utilitzar determinades freqüències, determinant la quantitat d'espectre, el període de temps per a l'ús i la zona geogràfica. També es té en compte les obligacions del que cedeix i el que és cedit.

## **7.4 Sumari**

En aquest capítol s'ha presentat el marc legal de les xarxes de ràdio cognitiva a Espanya i Europa. Primer de tot, s'ha parlat de la situació de les CRNs a Europa, on existeixen diferents grups de treball que investiguen la possibilitat de la implementació d'aquesta tecnologia.

Seguidament, s'ha donat una visió jurídica de l'espectre radioelèctric a Espanya per entendre que la implementació de les CRNs al nostre país no és gens fàcil. Per això s'ha analitzat quins avantatges i inconvenients hi haurien si s'adoptés el mercat secundari de l'espectre radioelèctric a Espanya.

# Capítol 8

## 8 Conclusions

En aquest projecte s'ha estudiat el desenvolupament de la ràdio cognitiva així com la reglamentació que s'està duent a terme per a poder implementar-la.

La ràdio cognitiva a de garantir que els dispositius tinguin les suficients característiques tècniques per evitar interferir amb les senyals dels usuaris primaris. Pel que fa a la detecció espectral, s'han de superar desafiaments referits a l'aleatorietat del canal sense fils o les incerteses dels "forats espectrals".

S'han de garantir tècniques de detecció ràpides, adaptatives i fiables, de mode que es tingui un coneixement a temps real de l'ocupació espectral en un determinat entorn geogràfic per a minimitzar les interferències en els usuaris principals.

És fonamental que la ràdio cognitiva accedeixi a aquelles freqüències desocupades en determinades bandes que han de definir-se per a un accés dinàmic. Aquest aspecte correspon a l'àmbit regulatori, ja que es tracta de l'administració de l'espectre.

En altres paraules, des de la viabilitat tècnica, és tècnicament factible la utilització d'aquesta tecnologia sempre que compleixi totes les capacitats mencionades. Des de la viabilitat regulatòria, encara falta un llarg camí per a que aquesta tecnologia pugui ser aplicada en diferents bandes de freqüències degut a que l'espectre radioelèctric està assignat sota un model rígid de control i assignació que especifica qui i com utilitza les freqüències, encara que algunes activitats d'estandardització i nous règims de gestió de l'espectre s'estan discutint.

A països com Estats Units, Canadà i Regne Unit, la ràdio cognitiva ja és una realitat. En canvi, pel que fa Espanya, aquesta només és un objecte d'estudi ja que no hi ha indicis de la seva introducció al mercat a causa del desinterès per part del Govern i de les operadores a que aquesta tecnologia sigui aplicada ja que es podria donar la possibilitat de que, existint la ràdio cognitiva, els usuaris fessin ús d'altres freqüències deixant de banda la seva i així poder tenir més serveis.

## Referències

- [1] FCC, ET Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order, December 2003.
- [2] S. Haykin, Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 23 (2) (2005) 201–220.
- [3] R.W. Thomas, L.A. DaSilva, A.B. MacKenzie, Cognitive networks, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 352–360.
- [4] FCC, ET Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order, December 2003.
- [5] M.M. Buddhikot, P. Kolody, S. Miller, K. Ryan, J. Evans, DIMSUMNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access, in: Proc. IEEE WoWMoM 2005, June 2005, pp. 78–85.
- [6] O. Ileri, D. Samardzija, N.B. Mandayam, Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via spectrum server, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 194–202.
- [7] S.A. Zekavat, X. Li, User-central wireless system: ultimate dynamic channel allocation, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 82–87.
- [8] FCC, \ET Docket no. 03-237 notice of inquiry and notice of proposed rulemaking,"no. 03-237. ET Docket, November 2003.
- [9] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, \Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," Computer Networks, vol. 50, no. 13, pp. 2127 { 2159, 2006}
- [10] G. Xue, J. Weng, T. Le-Ngoc, and S. Tahar, "Adaptive multistage parallel interference cancellation for CDMA," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 17, no. 10, pp. 1815–1827, Oct. 1999

- [11] J.A. Stine, Spectrum management: the killer application of ad hoc and mesh networking, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 184–193.
- [12] M.M. Buddhikot, P. Kolody, S. Miller, K. Ryan, J. Evans, DIMSUMNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access, in: Proc. IEEE WoWMoM 2005, June 2005, pp. 78–85.
- [13] D. Maldonado, B. Lie, A. Hugine, T.W. Rondeau, C.W. Bostian, Cognitive radio applications to dynamic spectrum allocation, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 597–600.
- [14] R. Murty, Software-defined reconfigurability radios: smart, agile, cognitive, and interoperable, Technology@Intel Magazine, July 2003.
- [15] D. Niyato i E. Hossian, “Spectrum trading: an economics of radio resource sharing in cognitive radio”. *IEEE Wireless Communications*, vol. 15, no. 6, pp. 71-80, 2008.
- [16] C.E. Caicedo i M.B.H. Weiss, “Spectrum trading: an analysis of implementation issues,” en *Proceeding of IEEE Internacional Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Abril 2007, pp. 579-584.
- [17] S. Zekavat i X. Li, “User-central wireless system: ultimate dynamic channel allocation,” en *Proceedings of IEEE Internacional Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, November 2005, pp. 82-87.
- [18] A Attara, S.A. Ghorashib, M. Sooriyabandarac, i A.H. Aghvamia, “Challenges of real-time secondary usage of spectrum”, *Computer Networks*, vol. 52, no. 4, pp.816-830, 2008.
- [19] J. Hou, J. Yang, I S. Papavassiliou, “Integration of pricing with call admission control to meet QoS requirements in cellular networks,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 13, no. 9, pp. 898-910, 2002.

- [20] Y. Zhou, D. Wu, I S.M. Nettles, "Authentication, authoritation, and accounting real-time secondary market services," en *Proceedings of IEEE Internacional Conference on Communications (ICC)*, vol. 2, May 2005, pp. 1005-1009.
- [21] R. V. Prasad, P. Pawlaczak, J.A. Hoffmeyer, i H. S. Berger, "Cognitive functionality in next generation wireless networks: standardization efforts," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp 72-78, 2008.
- [22] "IEEE 1900 standards committee, IEEE SCC 41" [Online]. Disponible en: <http://www.scc41.org>
- [23] FCC, "First report and order and further notice of proposed rule making," en *ET Docket NOs. 04-186 and 02-380, 21 FCC Rcd 12266, 12278*, Oct. 2006.
- [24] Industry Canada, Radio Systems Policy RP-06, "Where Initially TV channels 25, 34, 35, and 43 are Open for Licensing for Remote Rural Broadband Systems (RRBS)," June 2006.
- [25] OFCOM, "Digital dividend: cognitive access," en <http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/cognitive/>.
- [26] OFCOM, "Digital dividend: clearing the 800 MHz band," en <http://www.ofcom.org.uk/consult/condocs/cognitive/>.
- [27] M. McHenry, "Report on Spectrum Occupancy Measurements," *Shared Spectrum Company*, [http://www.sharespectrum.com/?section=nsf\\_summary](http://www.sharespectrum.com/?section=nsf_summary).
- [28] K. Challapali, S. Mangold, and Z. Zhong, "Spectrum Agile Radio: Detecting Spectrum Opportunities," in *ISART*, Boulder, CO, March 2004.

- [29] S. Mangold, Z. Zhong, K. Challapali, and C-T.Chou, "Spectrum Agile Radio: Radio Resource Measurements for Opportunistic Spectrum Usage," in *IEEE Globecom*, 2004
- [30] K. Challapali, "Spectrum Agile Radios: Real-time Measurements," in *Cognitive Radio Conference*, Washington DC, October 2004.
- [31] A. Sahai, N. Hoven, and R. Tandra, "Some fundamental limits on cognitive radio," *Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, October 2004.
- [32] IEEE 802.22, <http://www.ieee802.org/22/>, Document "22-05-0007-xx 0000\_RAN\_Requirements.doc".

## **Resum**

Aquest projecte estudia la tecnologia *Ràdio Cognitiva*. El concepte clau d'aquesta tecnologia és que permet a usuaris sense llicència compartir l'espectre radioelèctric de forma oportunista amb els usuaris amb llicència. Per començar, s'analitzaran les característiques principals, el seu funcionament i com coexisteixen amb els usuaris principals. Més endavant, s'explicaran els mètodes que s'usen per a la gestió de l'espectre radioelèctric i les activitats d'estandardització per a la implementació de les xarxes de ràdio cognitiva. Per últim, s'analitzarà la possibilitat de la implementació d'aquesta tecnologia a Espanya, analitzant els avantatges i inconvenients d'inicialitzar un mercat secundari de l'espectre radioelèctric.

## **Resumen**

Este proyecto estudia la tecnología *Radio Cognitiva*. El concepto clave de esta tecnología es que permite a usuarios sin licencia compartir el espectro radioeléctrico de forma oportunista con los usuarios con licencia. Para empezar, se analizarán las características principales, su funcionamiento y como coexisten con los usuarios principales. Más adelante, se explicaran los métodos que se usan para la gestión del espectro radioeléctrico y las actividades de estandarización para la implementación de las redes de radio cognitiva. Por último, se analizará la posibilidad de la implementación de esta tecnología en España, analizando las ventajas e inconvenientes de inicializar un mercado secundario del espectro radioeléctrico.

## **Summary**

This thesis studies the *Cognitive Radio* technology. The key concept of this technology is allowing unlicensed users to share the radio spectrum opportunistically with the licensed users. To begin, main features are going to be studied, as well as its performance and how it coexists with primary users. Later, methods used for spectrum management and the standardization activities for the implementation of cognitive radio networks will be presented. Finally, the possibility of implementing this technology in Spain is presented analyzing the advantages and disadvantages of setting up a secondary market for spectrum.